DICIEMBRE 2007

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

NEUROCIENCIA
¿Cómo surge la conciencia?

ESPINTRONICA
Computadores cuánticos hechos de diamante

CONSERVACION
Biodiversidad o bienestar humano, ése es el dilema

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

INFORME ESPECIAL

El futuro de la EXPLORACION ESPACIAL

- A la Luna y más allá
- 5 tareas esenciales en el espacio



SUMARIO

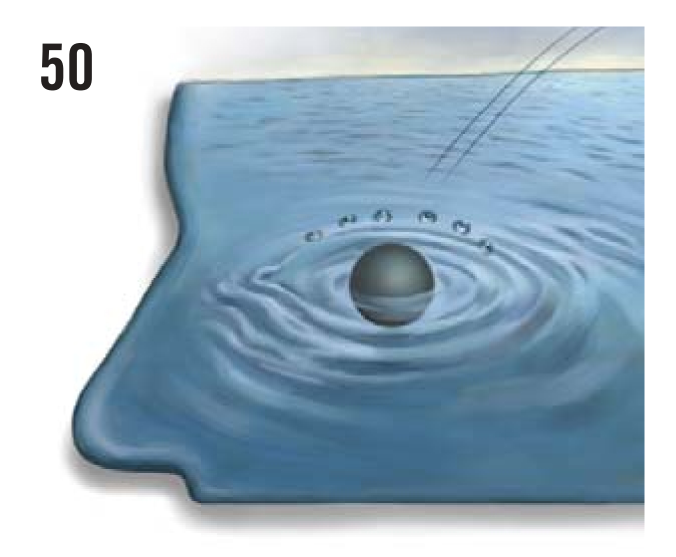
Diciembre de 2007/ Número 375



En Namibia se concedió a los pueblos indígenas la gestión de las reservas naturales. Ello ha redundado en beneficio de la vida salvaje y de las comunidades locales.

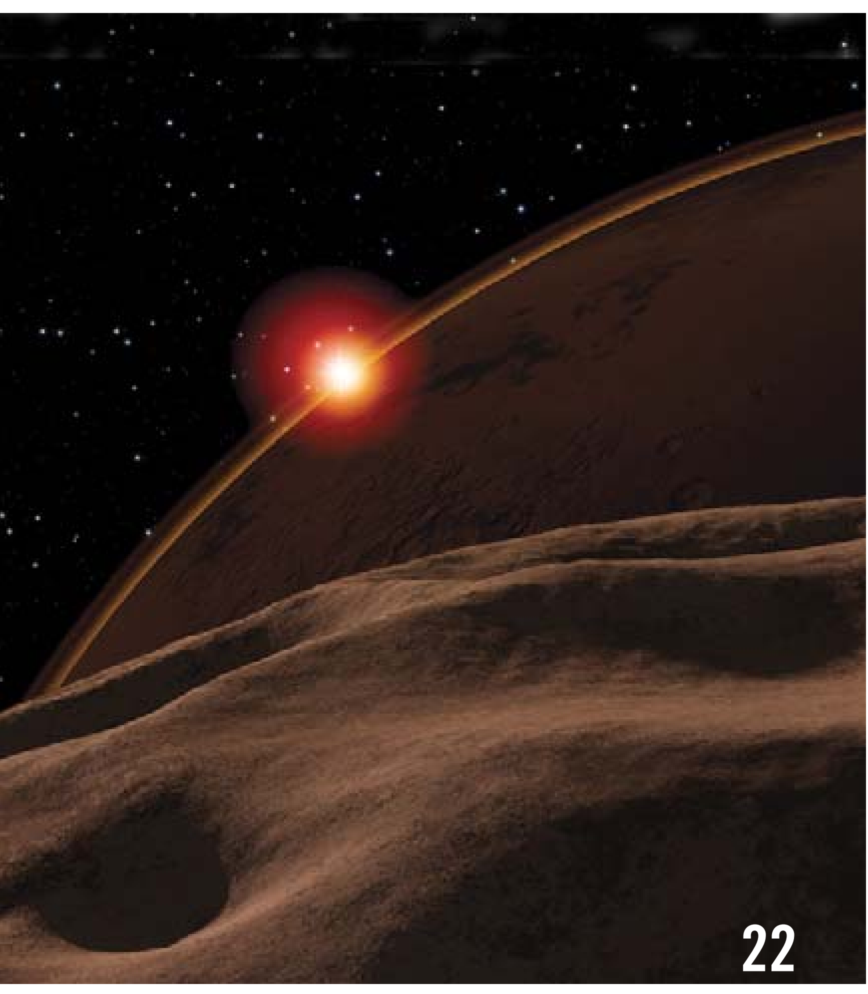


En Sonora afloran cadenas de batolitos graníticos de entre 120 y 40 millones de años de antigüedad.



No hay consenso sobre las estructuras neuronales que subyacen bajo la experiencia consciente.

ARTICULOS



La exploración del sistema solar, con naves tripuladas o autónomas, se plantea nuevos objetivos.



En el botiquín del futuro hallaremos fármacos experimentales.



El diamante encuentra un nuevo uso en electrónica, primer paso para los ordenadores cuánticos.

INFORME ESPECIAL

SECCIONES

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
CONTRIBUTING EDITORS W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Michael Shermer, Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

CHAIRMAN Brian Napack
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
VICE PRESIDENT Frances Newburg
GENERAL MANAGER Michael Florek

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

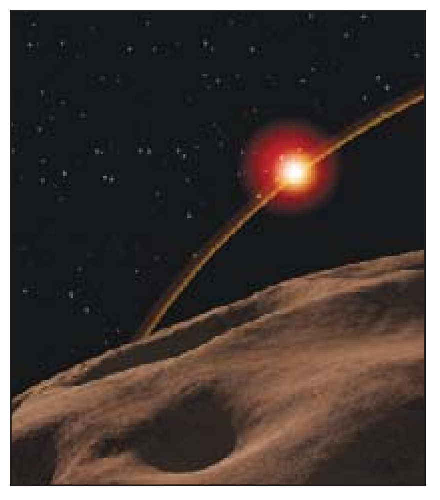
Madrid:
MMCATALAN PUBLICIDAD
M. Mercedes Catalán Rojas
Recoletos, 11 3.º D
28001 Madrid
Tel. y fax 915 759 278
Móvil 649 933 834

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Joandomènec Ros: *El hombre en los programas de conservación*; J. Vilardell: *El futuro de la exploración espacial*, *A la Luna y más allá*, *Hace...* e *Ideas aplicadas*; Mª Rosa Zapatero Osorio: *Cinco tareas esenciales en el espacio*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Luis Bou: *¿Cómo surge la conciencia?*, *Puesta al día* y *Apuntes*; Ramón Pascual: *La edad de diamante de la espintrónica*; Anna Ferran: *Administración de fármacos experimentales*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Ciencia y sociedad*; Ramón Muñoz Tapia: *Taller y laboratorio*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*



Portada: Ron Miller

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Sputnik 2: «Con el lanzamiento por la URSS de su segundo satélite artificial, de media tonelada de peso y llevando al espacio el primer organismo (una perrita de nombre Laika), la comunidad científica mundial se muestra dispuesta a aceptar que ya se ha iniciado la era de los viajes espaciales. Parecía inminente el disparo de un cohete a la Luna. Una declaración oficial, hecha pública a través de la agencia de noticias soviética Tass, afirmaba que ‘el aumento del tamaño de los satélites para dar cabida a un mayor número de instrumentos de medición y telemetría, e incluso a un animal como pasajero requería el desarrollo de nuevo instrumental y fuentes de energía mejoradas’».

[INFORMACION ACTUALIZADA: Hasta 2002 no se reveló que Laika había muerto a las siete horas del lanzamiento, probablemente debido a la tensión nerviosa y el calor.]

Exhibición de pingüinos: «Entre los animales que se exhiben en los parques zoológicos, unos de los más apreciados por el público son los pingüinos. Sin embargo, además de sufrir los riesgos inherentes al cambio de clima y las demás alteraciones de su entorno, esos animales están expuestos a la aspergilosis, un tipo de micosis. En los últimos años, algunos zoos han logrado preservar, pero no criar, pingüinos de clima frío mediante la construcción de espacios especiales refrigerados. La mejor muestra mundial de pingüinos tras mampara de vidrio es hoy, con toda probabilidad, la del parque zoológico del Bronx [en Nueva York]. En éste, pingüinos emperador, rey, barbado y de otras especies retozan en una piscina de agua enfriada para diversión de miles de visitantes.
—William J. L. Sladen»

1. PINGÜINOS DE ADELIA, 1957

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. 197, N.º 6, DICIEMBRE DE 1957 (*pingüinos*); VOL. XIII, N.º 13, 5 DE DICIEMBRE DE 1857 (*club*)

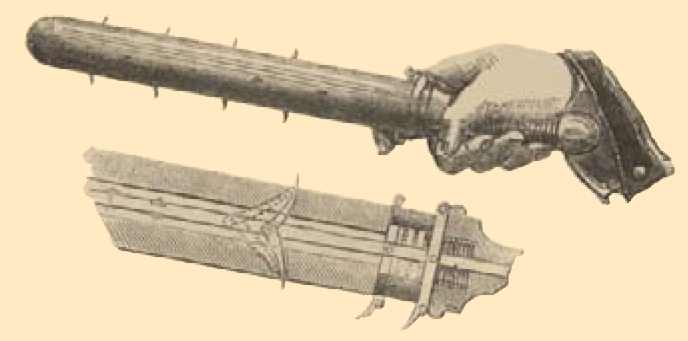
...cien años

Minas de carbón: «El señor Garfield, secretario del Departamento de Interior, anunció el incesante aumento del número de accidentes en las minas debidos, de forma directa o indirecta, a explosiones. Ello se atribuye, en parte, a la ausencia de una normativa minera adecuada y de obligado cumplimiento; también a la falta de conocimientos sobre explosivos y sobre las condiciones de uso en presencia de gas y polvo. Además, no sólo aumenta el número de mineros, sino que el carbón se está extrayendo a profundidades mayores o más alejadas de los accesos, en puntos donde la ventilación se hace cada vez más difícil. Durante el año 1906, murieron en el interior de las minas no menos de 2061 hombres.»

...ciento cincuenta años

La cima del mundo: «Ante la Academia de Ciencias de París se ha leído en fecha reciente una interesante ponencia. En verano de 1885, Hermann Schlaginweit exploró las zonas orientales del Himalaya (las montañas de Sikkim, Bhután y Kossia), donde midió la altitud de algunos picos. La cumbre más alta del mundo parece ser, según sus mediciones, la del Gahoorishanke, situada en la parte oriental de Nepal; se trata de la misma que anunció como tal el coronel Waugh, pero que él llamó monte Everest, porque le resultó imposible determinar el nombre auténtico en las llanuras del Indostán. El pico alcanza una altura de casi 9000 metros.»

Púas para la paz: «Esta porra, cuya solicitud de patente ha sido rechazada por el Comisario de Patentes, está especialmente concebida para la protección de los agentes de policía. Es hueca; cuando alguien la agarra para arrebatársela al policía, éste, al accionar el gatillo, hace salir unas púas tal como se muestra en la figura. Estas, al penetrar en la mano del atacante, obligan a éste a soltarla. Es opinión casi unánime que esas porras deberían ser admitidas de inmediato por la policía de todas las ciudades del mundo.»



2. PORRA CON PUAS (patente rechazada), 1857

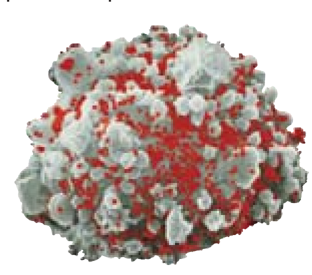
El espectro de la malaria: «En Inglaterra se ha pertrechado una nueva expedición con el propósito de adentrarse más en la exploración del río Níger, descrito por los árabes con el nombre de *Nel el Abeed*, o ‘río de los esclavos’, y que los negros llaman *Joliba*, o ‘aguas grandes’. Hasta ahora, el principal obstáculo a la penetración de los europeos en el interior de Africa ha sido el terrible clima. Este se ha mostrado máximamente letal para la raza blanca; ha constituido la gran barrera para los viajeros y los misioneros. Durante el verano de 1855, un experimentado médico administró quinina cada día a todas las personas de a bordo. El resultado fue que la expedición no sufrió ninguna pérdida humana. El azote de Africa se había neutralizado por completo. Así fortalecida contra el clima, la presente expedición será probablemente capaz de llevar a término su viaje sin peligros.»

¿Qué ha sido de ...?

Philip Yam

Contra el VIH

El pasado agosto, Pfizer logró autorización para comercializar Selzentry (maraviroc). Ese fármaco antisida es el primero de una categoría que actúa por bloqueo del receptor CCR5, uno de los portales primarios de penetración del virus en las células. El fármaco ha sido resultado de estudios con pacientes que resisten al VIH debido a que producen variantes mutadas del CCR5 [*véase* "Biotecnología de fármacos", en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1997]. Es posible que hasta un 60 por ciento de los individuos VIH-positivos sean portadores de la forma de virus que penetra en las células a través de CCR5.



1. BROTES de partículas de VIH (*rojo*) en un leucocito infectado.

Luz de sincrotrón

Los sincrotrones son aceleradores circulares de partículas. Cada vez que los imanes del sincrotrón curvan la trayectoria de los electrones que giran en su interior a velocidades cercanas a la de la luz, éstos emiten un haz de rayos X, o "luz de sincrotrón", que resulta útil tanto en ciencia básica como aplicada (*La luz de sincrotrón*, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 2000). Desde 1993 se cuenta con el compromiso de las administraciones catalana y española de construir una fuente de luz de sincrotrón. En junio de 2006 empezó la construcción del edificio del acelerador que va a materializar ese compromiso, ALBA, en Cerdanyola del Vallès, cerca de Barcelona. La fotografía (*arriba*) muestra el estado de las obras en noviembre de 2007. A lo largo de 2006 y 2007 se han ido firmando los contratos para la fabricación de buena parte de los dispositivos con que se equipará el acelerador. Se espera que la instalación quede concluida a finales de 2009.



No es la tormenta

Se ha conjeturado que al domeñar los síntomas podrían aumentar las probabilidades de supervivencia en los brotes gripales [*véase* "Preparados para una pandemia", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2006]. Las infecciones desencadenan una liberación de citoquinas, proteínas responsables de respuestas inflamatorias, entre ellas, una marejada de linfocitos y el sacrificio de células moribundas o víctimas del virus. La respuesta citoquinética al virus aviario H5N1 es de una virulencia especial; se opina incluso que semejante "temporal citoquinético" podría ser la causa principal de mortalidad. Por otra parte, no parece que aumente la supervivencia al impedirlo. Ratones modificados genéticamente para que no produjesen una de las citoquinas clave (TNF-alfa) no corrieron mejor suerte que los ratones normales tras sufrir las infecciones. Lo mismo les ocurrió a ratones dosificados con fármacos supresores de citoquinas. Esas observaciones, publicadas en *Proceedings of the National Academy of Sciences* del 24 de julio, hacen pensar que las medidas terapéuticas deberían ir orientadas contra el virus propiamente dicho.



Asfixiados en Marte

Los exploradores marcianos Opportunity y Spirit parecen haber capeado lo peor de los temporales que han sufrido: las capas de polvo. Sobre todo en julio pasado, intensas tormentas de polvo privaron de luz a los paneles fotovoltaicos, lo que causó un grave déficit de energía. La generación de electricidad de Opportunity se desplomó hasta 128 watt-hora, cuando el promedio normal era de 700. Faltos de alimento, los equipos electrónicos podrían llegar a congelarse, dejando a los robots inutilizados sin remedio. Pero a mediados de agosto, las tormentas habían remitido bastante y las máquinas pudieron recargar sus baterías. En vista de la robustez de los exploradores robóticos, es posible que puedan dar la bienvenida al "aterrizador" Phoenix. La NASA lanzó ese instrumento el 4 de agosto, que deberá posarse en Marte el 25 de mayo de 2008. Su misión: investigar la existencia de agua en las llanuras septentrionales del planeta rojo [*véase* "Agua en Marte", en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2007].

2. MODELO del explorador Opportunity.



NIBSC *Photo Researchers, Inc.* (*partículas de VIH*); TENGKU BAHAR *AFP/Getty Images* (*gripe aviar*); SINCROTRON ALBA (*sincrotrón*); MARS EXPLORATION ROVER MISSION, UNIVERSIDAD DE CORNELL, JPL, NASA (*explorador*);

FISICA

¿Qué es una “fuerza ficticia”?

Las fuerzas que se sienten dentro de un coche en marcha —las que nos pegan al respaldo del asiento cuando el conductor acelera o hacia los lados al doblar curvas pronunciadas— son ejemplos cotidianos de fuerzas ficticias. En general, tales efectos se deben a que se está acelerando el marco de referencia que, en la situación de que se trate, resulta natural.

La expresión “fuerza ficticia” posee un significado preciso en la mecánica de Newton: siempre es proporcional a la masa del objeto sobre el que actúa.

Un ejemplo elegante de estos tipos de influencias aparentes es la llamada fuerza de Coriolis, responsable de la majestuosa precesión (o rotación circular) del plano de oscilación de un péndulo suspendido Si ese péndulo estuviera situado sobre el mismo polo norte, un observador en la Tierra lo vería girar 360 grados cada día. Pero si ese observador se colocara en un punto estacionario del espacio exterior, vería que el péndulo oscila en un plano fijo, único, mientras la Tierra gira a sus pies. Desde la perspectiva del espacio exterior, no hay fuerza lateral alguna (es decir, perpendicular al plano de oscilación) que desvíe el vaivén del péndulo. Por eso se denomina “ficticia” esta fuerza, con cierto matiz peyorativo. De modo análogo, ninguna fuerza real nos aprieta contra el respaldo, pese a lo que sintamos.

Las hojas de té ofrecen un atractivo ejemplo de los efectos de la fuerza de Coriolis. Si en una taza de té se dejan unas hojas una vez agitado el líquido, éstas acaban por depositarse en un montón central en el fondo (y no en las orillas, como podría esperarse, por efecto de la fuerza centrífuga, asimismo ficticia). Imaginemos que nosotros mismos rotamos en sincronismo con el fluido: la mayor parte del mismo nos parecerá inmóvil mientras la taza gira a nuestro alrededor en sentido inverso. Esa taza giratoria arrastra consigo algún fluido adyacente. Cerca del fondo, la fuerza de Coriolis ejercida sobre ese fluido arrastrado lo empuja —junto con las hojas de té— hacia el fondo de la taza.

Con su teoría de la relatividad general, Albert Einstein logró borrar definitivamente la distinción entre fuerzas reales y ficticias. Piedra angular de la teoría de Einstein es que la gravedad, ciertamente el ejemplo paradigmático de una fuerza “real”, es en sí misma una fuerza ficticia o aparente (o, más bien, que no se puede distinguir de una fuerza ficticia). Hoy, unos 90 años después, tenemos innumerables y diarias confirmaciones de que sus hipótesis han resultado acertadas.

—David Politzer
Instituto Tecnológico de California y Premio Nobel de 2004

MATERIAS PRIMAS

Escasez de helio

Los precios del helio se han duplicado en los últimos cinco años. La fuerte demanda no nace de inflar globos en las fiestas: el helio se utiliza para refrigerar los arrollamientos superconductores de los equipos de formación de imágenes por resonancia magnética (RM). Las ventas de esas máquinas han crecido enormemente, por lo que la demanda de helio se ha ido incrementando a razón de un 25 por ciento anual desde 2003. En cambio, la producción de helio ha aumentado sólo en un 50 por ciento a lo largo del mismo plazo.

Los EE.UU. vendieron en 2006 unas 23.000 toneladas métricas de helio, cubriendo con ello el 71 por ciento de las necesidades mundiales. Argelia y Rusia suministraron casi todo el resto. Al menos un tercio de la aportación estadounidense provino de la reserva federal de helio, que se constituyó en 1961, cuando el helio se consideraba un recurso de interés militar y estratégico. La reserva había acumulado 170.000 toneladas de helio en 1996, almacenado principalmente en yacimientos de rocas porosas en el campo de gas de Cliffside, cerca de Amarillo, en Texas. Una ley de 1996 establecía, con el fin de trasladar al sector privado una serie de programas de gestión pública, la venta de todas las reservas, a excepción de 2900 toneladas, antes de 2015. De ser así, según un informe de la Academia Nacional de Ciencias, la totalidad de los recursos estadounidenses de helio habría desaparecido en 2035 —antes, posiblemente— debido al crecimiento de la demanda. Según Joseph Peterson, de la Oficina de Gestión del Territorio, el organismo responsable de la reserva, si en los cinco próximos años no llegan al mercado nuevas fuentes de helio se producirá una escasez del gas. Deberán refinarse las técnicas de reciclaje de este recurso, escaso y no renovable, para prevenir penurias.

—Sourish Basu

BIOLOGIA

Una vida limpia no tiene por qué ser más larga

Las bacterias, por inofensivas que sean, absorben la energía de sus anfitriones y aceleran su muerte. O eso se creía. Nuevos hallazgos muestran que las moscas de las que se ha eliminado toda bacteria no viven más que sus congéneres infestados. Debido a que el número de bacterias que habitan dentro del cuerpo o en su superficie aumenta con la edad, se esperaba que, tanto en las moscas como en los humanos, esas infecciones fuesen dañinas y esquilmasen las reservas de sus anfitriones. Científicos de la Universidad del Sur de California han comparado moscas de la fruta normales con otras nacidas de huevos lavados con antibióticos y crecidas en entornos exentos de bacterias. Incluso se alimentaba a las moscas con comida desinfectada. Sorprendentemente, las moscas de la fruta normales y las “higienizadas” tenían la misma esperanza de vida, unos 65 días. Estos experimentos no se pueden reproducir en organismos más evolucionados, que necesitan las bacterias para una adecuada digestión y otras funciones. No obstante, los investigadores que realizaron los trabajos afirman que sus resultados cribarán los factores que contribuyen a limitar la longevidad en los animales.

—Charles Q. Choi
Cell Metabolism, 8 de agosto

GETTY IMAGES (*montaña rusa*); CHARLES D. WINTERS *Photo Researchers, Inc.* (*tanque de helio*)

ASTRONAUTICA
Basura espacial



El 23 de julio, los astronautas de la Estación Espacial Internacional arrojaron al exterior un depósito de amoniaco de 630 kilos de peso, del tamaño de un frigorífico, y un soporte de cámara en desuso de 96 kilos. La NASA desaprueba que se tiren residuos al espacio, pero hizo una excepción en este caso porque las piezas eran demasiado grandes para traerlas de vuelta en una misión del trasbordador (caerán de la órbita en aproximadamente un año y se desharán por consunción). Más peligrosos son los objetos de menos de 10 centímetros de diámetro; las estaciones terrestres no siguen su rastro. Un meteoroide de un milímetro de diámetro puede agujerear el traje de un astronauta. Hemos pedido a Bill Cooke, del Centro de Vuelo Espacial Marshall de la NASA, en Huntsville, Alabama, y a Mark Matney y Eric Christiansen, del Centro Espacial Johnson de la NASA en Houston, todos ellos especialistas en impactos de residuos orbitales y meteoroides, que nos ofrezcan algunos detalles sobre la posibilidad de que se produzcan colisiones. *—Sourish Basu*

Velocidad de impacto, en kilómetros por segundo, de:
Meteoroides: 12 a 72
Desechos: 5 a 15
Bala de una pistola: 0,34
Tamaño preocupante:
> 1 milímetro
Altitud habitual de los residuos en órbita, en kilómetros:
700 a 1000
Altitud de la Estación Espacial Internacional y del trasbordador espacial, en kilómetros:
300 a 400
Porcentaje de probabilidad de impacto con:
Residuos espaciales: 0,12 a 0,2
Micrometeoroides: 0,08 a 0,13
Probabilidad de perder un trasbordador por un impacto:
de 1 entre 500 a 1 entre 300
Toneladas diarias de meteoroides que caen sobre la Tierra: 16,5

PASCAL GOETGHELUCK *Photo Researchers, Inc.* (*fósil*); MATT COLLINS (*astronauta*); SMILY ALAMSON (*manzanas*)

ANTROPOLOGIA FISICA
Homínidos simultáneos

RELACIONES DE PARENTESCO: Puede que el *Homo habilis* no haya evolucionado hasta dar lugar al *H. erectus*. La calavera de *H. habilis* que se muestra en la foto tiene 1,8 millones de años de antigüedad.

El árbol genealógico de los seres humanos acaba de enmarañarse un poco más: un fósil recientemente descubierto indica que es posible que el *Homo habilis* no haya evolucionado para dar lugar al *Homo erectus*, de mayor tamaño. Se ha encontrado un maxilar de *H. habilis* cerca del lago Turkana, en Kenia, de 1,44 millones de años de antigüedad. Por entonces, el *H. erectus* habitaba también en esa zona. Si los dos homínidos coexistieron, es probable que evolucionaran por separado de un antepasado común. Los fósiles más antiguos de *habilis* y *erectus* encontrados en Africa Oriental tienen 1,9 millones de años de antigüedad. Existieron, pues, simultáneamente en la región durante medio millón de años. El antepasado común de ambas especies tuvo que haber vivido hace 2 o 3 millones de años. No se sabe si era muy diferente de las dos especies o si se asemejaba a *habilis*, la más antigua: los únicos restos de esa época son fragmentos de herramientas de piedra y unos pocos dientes.

— J. R. Minkel
Nature, 9 de agosto

BIOQUIMICA
¿Por qué pardean las manzanas al rato de haberlas cortado?

Cuando se corta en rodajas una manzana, el oxígeno introducido en el tejido dañado reacciona con sustancias allí presentes y provoca su pardeamiento. Cuando hay oxígeno en las células del tejido, la enzima polifenoloxidasa (PPO) residente en los cloroplastos (puntos que albergan clorofila y dirigen la fotosíntesis) oxidan rápidamente los compuestos fenólicos que existen en los tejidos de la manzana y los convierten en o-quinonas. Estas sustancias incoloras se agregan por sí mismas en polímeros o reaccionan con aminoácidos o proteínas para formar en el tejido de la fruta productos secundarios de pigmentación oscura.

Para evitar ese pardeamiento enzimático, podemos limitar la acción oxidante de la polifenoloxidasa o disminuir la porción de sustrato al que se adhiere la enzima. Bañando en azúcar o jarabe las manzanas recién cortadas se reduce la difusión de oxígeno y, por tanto, la reacción de pardeamiento será más lenta. También retardan la decoloración los jugos de limón o de piña, ambos ricos en antioxidantes. (Además, ambos jugos son ácidos; su bajo *p*H reduce la actividad de la PPO.) Y aunque así se modifique la textura del fruto, la enzima mencionada puede inactivarse por calentamiento: blanquear las manzanas en agua hirviendo durante cuatro a cinco minutos suprimirá casi del todo los efectos de la PPO.

El efecto descrito no es exclusivo de las manzanas. La polifenoloxidasa existe en casi todos los tejidos vegetales y también en bacterias, animales y hongos. En realidad, el pardeamiento por PPO no siempre es rechazable; el color del té, café y cacao proviene del pardeamiento enzimático producido por la PPO durante su elaboración.

—Lynne McLandsborough
Universidad Amherst de Massachusetts

ATCG, el futuro de la agricultura

Alimentos, energía y materiales producidos en una industria ecosostenible

La Sociedad Europea de Ingeniería Agronómica (EurAgEng) concedió, en su congreso de 2004, el Premio UNACOMA de prospección científica a nueve investigadores de la Universidad Politécnica de Madrid. Este premio, patrocinado por la asociación de fabricantes de maquinaria agrícola italiana, promueve la búsqueda de respuestas a dos cuestiones fundamentales: qué puede hacer la ingeniería agronómica por la sociedad y cómo será la agricultura del futuro.

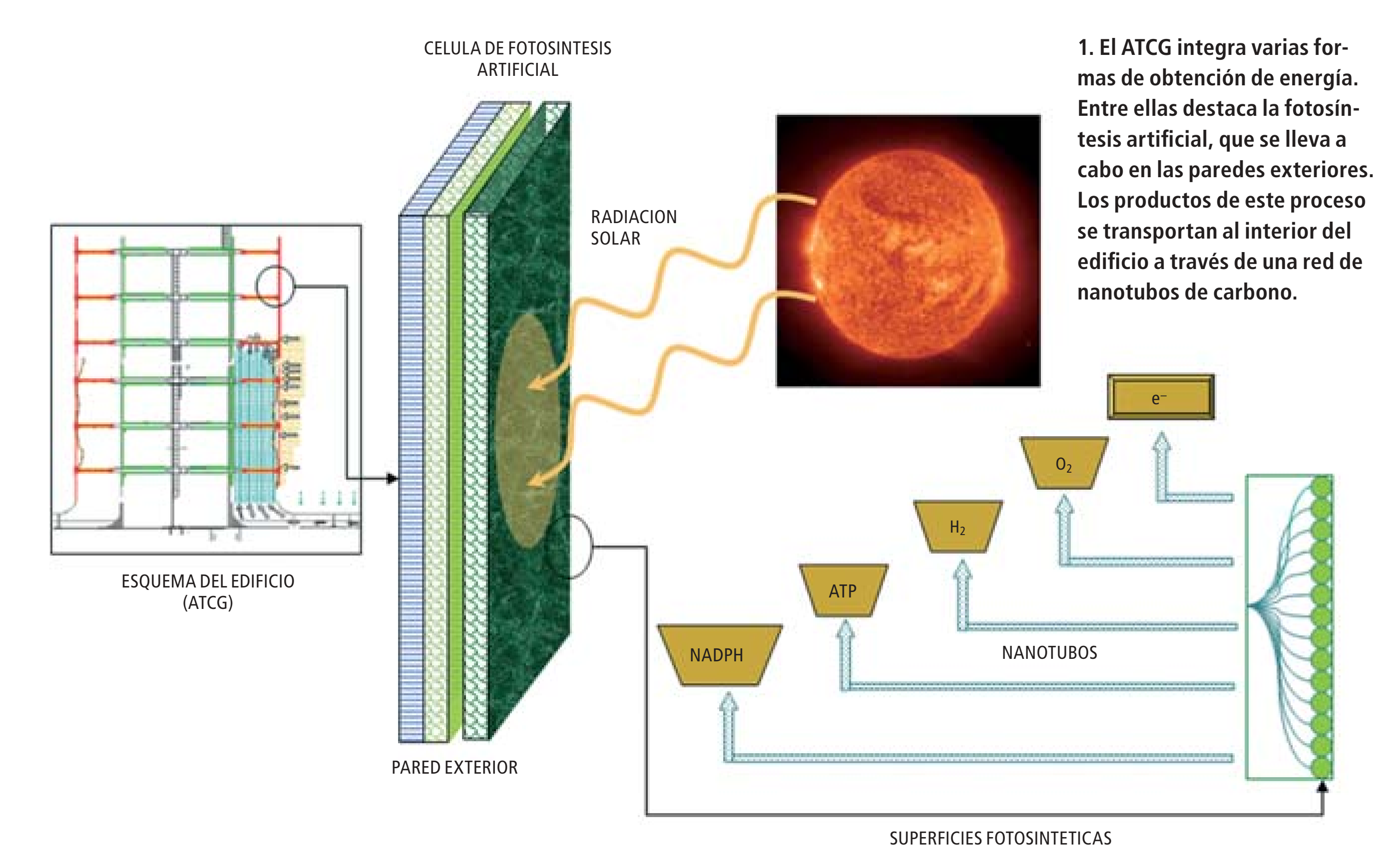
El proyecto premiado combina nanorrobótica, mecatrónica, biotecnología, biónica y otras técnicas en un sistema para la obtención de alimentos, energía y materiales: el edificio autosuficiente ATCG ("Agricultural Transformation Clustered Greenfactory"). Con ello se propone resolver problemas derivados del aumento de población, la escasez de alimentos, el exceso de consumo energético y la degradación del medio natural. El proyecto desliga la producción agrícola del campo, a través de la producción sin suelo. Asimismo, aúna la obtención de alimentos, energía y materiales en un ciclo productivo cerrado y sin residuos.

El diseño del edificio se basa en principios de la arquitectura biónica. Una estructura ligera y flexible remeda los modelos constructivos de los tejidos vegetales. Contiene soldaduras deformables realizadas con proteínas; consta de superficies fractales con capacidad de crecimiento modular que absorben tensiones. La estructura define una columna hueca, formada por una fina membrana plegada encapsulada con hormigón; los pliegues le confieren resistencia. El recubrimiento exterior ofrece la resistencia y permeabilidad de una estructura reticular; facilita la circulación del aire y la entrada de luz.

El ATCG obtiene la mayor parte de su energía del Sol. Destaca la fotosíntesis artificial que realizan las paredes del edificio. Estas constan de una capa doble de policarbonato, cubierta con dos fotosistemas que remedan el fotosistema vegetal. Un híbrido constituido por la unión de fullerenos y fluoresceína opera a modo de antena colectora de luz: convierte los fotones en electrones que alimentan las unidades del interior del edificio. La oxidación del agua, catalizada por un quelato de manganeso, se convierte en una abundante fuente de electrones, hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). El hidrógeno y el oxígeno se almacenan para su consumo en pilas de combustible.

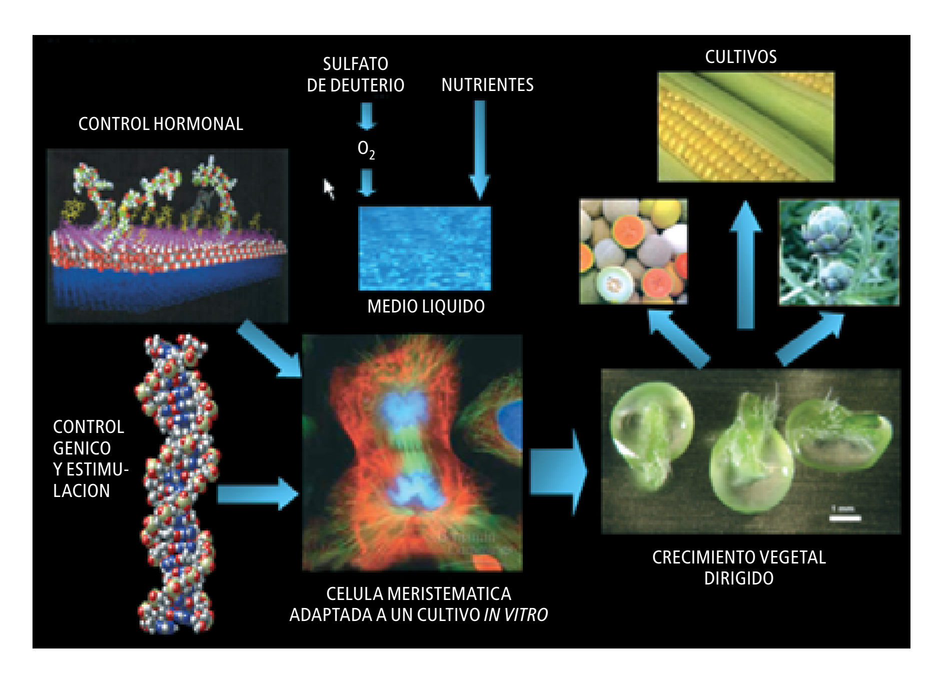
Todos los componentes del fotosistema se integran en una biomembrana; en ella se genera el gradiente de protones que permite la síntesis de ATP. Los productos de la fotosíntesis se conducen y almacenan hacia el interior del edificio, a través de una red de nanotubos de carbono. Luego, estos reservorios suministran a las unidades de producción del ATCG los compuestos necesarios para los procesos metabólicos que allí se desarrollan.

La energía solar se capta también mediante paneles fotovoltaicos. Se utilizan para calentar el aire. Este fluye entonces



1. El ATCG integra varias formas de obtención de energía. Entre ellas destaca la fotosíntesis artificial, que se lleva a cabo en las paredes exteriores. Los productos de este proceso se transportan al interior del edificio a través de una red de nanotubos de carbono.

ILUSTRACIONES DE LOS AUTORES



2. En las unidades de producción, o terminales meristemáticos, se cultivan, mediante ingeniería génica, células que terminan produciendo sólo la parte comestible del vegetal de interés en lugar del organismo completo.

por el interior de la columna, de forma que provoca el movimiento de unas turbinas productoras de electricidad. A su vez, el aire suministra la mezcla de gases necesaria par la producción de alimentos (oxígeno, carbono y nitrógeno). El nitrógeno del aire se fija mediante microorganismos genéticamente modificados, que viven en el interior de las cavidades estructurales del ATCG. El nitrógeno orgánico obtenido se destina a la síntesis de compuestos químicos.

Otra de las funciones del ATCG es el reciclado de aguas residuales. El agua residual fluye a través de pilas de combustible de microorganismos. Mediante la acción metabólica bacteriana, se obtiene corriente eléctrica y agua reciclada.

En el interior del edificio residen las unidades de producción o "meristemos terminales" (MT). Operan mediante técnicas de cultivo *in vitro*. La producción se funda en una diferenciación controlada de los tejidos vegetales dentro de unos contenedores especiales; se estimulan sólo los genes necesarios para obtener la parte comestible del vegetal, no el organismo entero. Para ello se silencian los genes carentes de interés agronómico.

Los MT se sumergen en un medio líquido que les aporta los nutrientes y hormonas necesarios para el desarrollo del cultivo. El medio contiene también sulfato de deuterio, que facilita la respiración celular y evita, por tanto, la podredumbre de los tejidos por asfixia. Mediante el control fino de la concentración de nutrientes y de hormonas, y técnicas de ingeniería genética, se dirige el crecimiento y desarrollo del cultivo. El ATCG se aplica así a la producción de alimentos y de materiales (carbonatos, bioplásticos y otros compuestos de carbono).

El sistema está diseñado para que pueda monitorizarse y controlarse mediante nanotecnia. El seguimiento se realiza a tres niveles: microscópico, macroscópico y sistémico. Para el control a escala microscópica se usan dispositivos bioelectrónicos y nanorrobóticos, que interaccionan electroquímicamente con los tejidos en crecimiento (meristemos) y las unidades de producción de energía.

Robots con habilidades sociales y dotados de inteligencia artificial basada en redes neuronales controlan, a escala macroscópica, los principios básicos de producción. Temperatura, *p*H, luz y otros parámetros que afectan a la producción se controlan y modifican mediante sensores electroquímicos y microinyectores, con el fin de maximizar la "cosecha" y optimizar la calidad del alimento.

Por último, la producción se ajusta a la demanda mediante la coordinación de varios ATCG. Una red inalámbrica media el intercambio de información entre las unidades productivas y con otros centros de producción y comercialización.

Constantino Valero, Pablo Gutiérrez, M.ª Teresa Riquelme, Víctor Gil, Luis Ruiz, Belén Diezma, María Marín, Natalia Hernández y José Rodríguez
Departamento de Ingeniería Rural, ETSI Agrónomos
Universidad Politécnica de Madrid

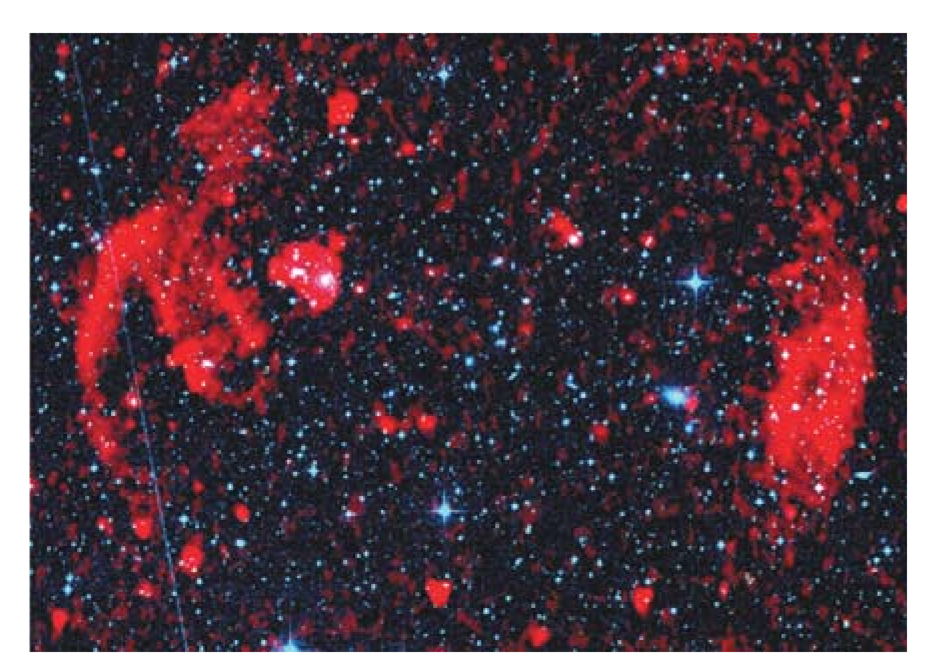
Nuevos comienzos

Ideas sobre el tiempo anterior a la gran explosión que podrían comprobarse

Suele imaginarse la gran explosión como el principio de todo, incluyendo el tiempo, con lo cual las preguntas sobre lo que sucedió antes serían absurdas. Sin embargo, cada vez hay más teorías que abarcan la existencia de una etapa *anterior* a la gran explosión. De acuerdo con tales teorías, es posible que existan huellas de esa etapa y que una futura generación de telescopios podría descubrirlas.

Según la tesis predominante sobre la gran explosión, el universo surgió de un punto de infinita energía y densidad, una singularidad en la que dejan de regir las leyes de la física. El universo sufrió entonces una "inflación": se expandió durante un período brevísimo a una velocidad mucho mayor que la de la luz. Como habría extendido el cosmos de forma bastante regular, esta inflación resolvería diversos enigmas; entre otros, la causa de que el espacio-tiempo sea "plano" y el motivo por el que la luz se desplaza en línea recta y no en curva: la inflación habría alisado las ondulaciones del universo primitivo. Las oscilaciones producidas durante la inflación podrían explicar también la estructura general de la distribución de galaxias que observamos en la actualidad.

Las observaciones de la radiación de fondo de microondas cósmicas, el calor



JOYDEEP BAGCHI *IUCAA, NRAO/AUI/NSF*

LAS HIPOTESIS DE UN TIEMPO ANTERIOR A LA GRAN EXPLOSION deben explicar cómo se formaron los cúmulos de galaxias (*azul*) y otras macroestructuras del universo.

residual de la gran explosión, han confirmado varias predicciones del modelo inflacionario. Aun así, la inflación debería haber provocado poderosas ondas gravitatorias que, a su vez, habrían distorsionado, de forma perceptible, las microondas cósmicas. Sin embargo, los telescopios no han detectado hasta el momento las distorsiones de marras, con la exclusión consiguiente de varios modelos inflacionarios. Además, los críticos afirman que las teorías que respaldan la inflación exigen de ésta que sea un proceso eterno; debería generar un número infinito de bolsas de espacio con propiedades diferentes, lo cual requeriría teorías más complejas para explicar por qué vivimos en una bolsa que muestra la planitud y estructura que vemos.

Desde hace 15 años han venido proponiéndose teorías antagónicas, que postulan una época anterior a la gran explosión, durante la cual nuestro universo se contrajo y luego rebotó. El modelo ekpirótico, avanzado en 2001, genera adecuadamente la estructura, la forma plana y las demás características del universo actual. (Debe su nombre a un viejo concepto estoico, el de *ekpyrosis*, un fuego del que el universo renace sin solución de continuidad.) El modelo cíclico, derivado en el año 2002 del modelo ekpirótico, explica también la energía oscura que, se piensa, está causando la aceleración de la expansión universal [*véase* “El universo antes de la gran explosión”, por Gabriele Veneziano; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2004].

Pero esos modelos con rebote no convencieron a muchos físicos teóricos. En ellos se supone que las oscilaciones previas a la gran explosión traspasaron con éxito la barrera de una singularidad para generar la estructura del universo actual, una idea ante la cual "la mayoría de los cosmólogos se muestran escépticos", reconoce Paul Steinhardt, cosmólogo de la Universidad de Princeton, que, junto con Neil Turok, físico teórico de la Universidad de Cambridge, contribuyó a desarrollar los modelos ekpirótico y cíclico.

En los últimos meses, han proliferado nuevos modelos con rebote. Los hay para todos los gustos. Muchos evitan la singularidad y ninguno necesita dimensiones más allá de las cuatro del espacio y del tiempo, pese a que su formulación original se basaba en la multidimensional teoría de cuerdas. "Existe mucho escepticismo contra el rebote, debido, quizás, a la teoría de cuerdas", afirma Steinhardt. "Estos nuevos resultados utilizan una física más familiar y deberían convencer a la mayoría de los cosmólogos, incluso a quienes se resisten a considerar la posibilidad de otras dimensiones, de que existen alternativas reales para la inflación".

Se cuenta con un par de modelos que, para evitar una singularidad en la gran explosión, suponen que un fuerte impulso impidió que el universo anterior se colapsara hasta reducirse a un punto. Esta fuerza habría sido causada por un "condensado fantasma", un fluido de partículas exóticas que, en teoría, pueden ejercer incluso más presión que la energía oscura. Los enunciaron, por separado, el físico teórico Burt Ovrut y sus colaboradores de la Universidad de Pennsylvania, y el cosmólogo Paolo Creminelli, del Centro Internacional Abdus Salam de Física Teórica en Trieste, con la colaboración del cosmólogo Leonardo Senatore, de la Universidad de Harvard.

En la naturaleza misma del espaciotiempo podría encontrarse otra forma de eludir la singularidad. Basándose en la gravedad cuántica de bucles, una alternativa a la teoría de cuerdas, Martin Bojowald, físico teórico de la Universidad estatal de Pennsylvania, calcula que, a escalas muy pequeñas, el espaciotiempo puede exhibir repulsión; se evitaría así el colapso. Una consecuencia de esta hipótesis es lo que él llama el "olvido cósmico", que hace que el universo, después del gran explosión, olvide parte de sus propiedades pasadas y adquiera otras nuevas, independientes de las anteriores.

Los nuevos modelos con rebote generan ondas gravitatorias posteriores a la gran explosión mucho más débiles que las producidas por la inflación. La diferencia es de 50 órdenes de magnitud. Si los telescopios del futuro, dotados de mayor sensibilidad, como el *Planck Surveyor*, siguiesen sin descubrir las distorsiones en el fondo de microondas que la inflación con sus ondas gravitatorias debería haber creado, daría peso a la idea de una era anterior a la gran explosión. "Creo que es justo decir que hoy la inflación resulta más convincente", afirma Creminelli. "Sin embargo, al final serán los datos experimentales los que decidan entre las propuestas alternativas."

Charles Q. Choi

Inflación-Deflación

Varias hipótesis novedosas y alternativas a la inflación cósmica postulan un ciclo de nacimiento y muerte para el universo. Pero no todas las propuestas exigen semejantes reencarnaciones. Robert Brandenberger y sus colaboradores, de la Universidad McGill, conjeturan que el universo comenzó con un gas de cuerdas denso y caliente, hebras de energía cuyas vibraciones generan fuerzas y partículas elementales. Las fluctuaciones térmicas de este gas indujeron la formación de cúmulos de galaxias y otras estructuras cósmicas. Este modelo es "agnóstico" con respecto a si existió o no algo antes de la gran explosión, afirma Brandenberger. Si fuese correcto, implicaría la existencia de huellas gravitatorias que podrían detectarse en el futuro con mejores telescopios.

Bombillas tóxicas

Las reglas de reciclaje son diferentes para los fluorescentes que contienen mercurio

Crece el número de consumidores que compran bombillas fluorescentes compactas (BFC) o de bajo consumo. Sus pequeños tubos, en forma de u alargada o de muelle, que utilizan el 25 % de la energía de las bombillas normales y duran 10 veces más, se han convertido en un símbolo de vida ecológica y un medio para luchar contra el cambio climático. Australia hará que los hogares y las oficinas sustituyan todas las bombillas incandescentes por BFC antes del año 2010. Reducirán así sus emisiones de gases de efecto invernadero en un total de cuatro millones de toneladas al año. Al menos cuatro estados norteamericanos y el Congreso de los Estados Unidos están considerando la posibilidad de aprobar una normativa similar. También se está pensando en medidas similares para la Unión Europea.

Sin embargo, las BFC presentan un inconveniente: contienen mercurio. No se las puede tirar a la bolsa de la basura. En los Estados Unidos se habrán vendido este año alrededor de dos mil millones (en torno al 5 por ciento de las ventas totales de bombillas). Cabe, pues, preguntarse sobre la gestión de esas diez toneladas de mercurio anuales que procederán de las bombillas desechadas.

El mercurio es esencial para el funcionamiento de las bombillas fluorescentes. Una carga electrostática vaporiza el mercurio y hace que emita luz ultravioleta, luz que provoca el brillo del revestimiento de fósforo del interior de las bombillas. El mercurio, una potente neurotoxina, constituye un riesgo serio para los fetos y los niños. Alrededor de una sexta parte de los niños que nacen en los Estados Unidos han estado expuestos a niveles de mercurio tan altos, que corren el peligro de sufrir pérdidas de memorias y déficits en el aprendizaje, según la Agencia de Protección Medioambiental.

Cada BFC contiene unos cinco miligramos de mercurio, más o menos la cantidad de tinta en la punta de un bolígrafo. Por supuesto, el mercurio de las BFC no presenta el mismo riesgo que el mercurio que puede encontrarse en el



LAMPARAS EN UN DOMICILIO ECOLOGICO: Las bombillas de bajo consumo utilizan menos energía que las bombillas incandescentes habituales, pero debido a su contenido en mercurio suponen un riesgo ambiental.

pescado (en una lata de atún no debería haber más de un par de décimas de miligramo). Sin embargo, puede filtrarse en los vertederos hasta los acuíferos; si se encuentra en residuos incinerados, lo arrastrará el aire consigo.

A pesar de años de esfuerzos, los fabricantes no han conseguido encontrar un sustituto del mercurio. Sí han podido reducir la cantidad de mercurio de cada bombilla. Aunque los usuarios industriales conocen bien la necesidad de reciclar los tubos fluorescentes, los consumidores domésticos no se hallan familiarizados todavía con esa praxis. La tasa de reciclado de bombillas fluorescentes en los Estados Unidos está en torno al 24 por ciento, según la Asociación de Reciclaje del Alumbrado y el Mercurio.



Actualmente, las opciones de reciclaje de las BFC varían de un estado a otro de la Unión. Hay paquetes de reciclaje que se expiden por correo y cuestan aproximadamente 1 dólar por bombilla. La cadena de grandes almacenes Wal-Mart, que el año pasado anunció su objetivo de vender 100 millones de BFC al año, dispone ahora de kioscos para las BFC gastadas, pero únicamente en sus tiendas de California. El Servicio Postal sopesa la posibilidad de poner en marcha un programa de recuperación mediante contenedores de reciclaje en sus oficinas.

Al menos un estado ha conseguido mostrar que el reciclaje de BFC es factible desde el punto de vista económico. Vermont tiene uno de los niveles más altos de ventas de BFC por hogar y, en 1998, fue el segundo estado (después de Minnesota) en aprobar una ley que obliga a reciclar las BFC. En agosto de 2005, las ferreterías True Value de Vermont comenzaron a recoger las bombillas gastadas de los clientes y a enviarlas de vuelta a los almacenes en los camiones de reparto de mercancías. Este proceso de "distribución a la inversa" cuesta unos 35 centavos por bombilla (una encuesta en todo el estado encontró que dos tercios de los habitantes de Vermont pagarían 50 centavos para reciclar una bombilla).

Con esta estrategia, Vermont ha reciclado cuatro kilómetros de tubos fluorescentes tradicionales y 4000 BFC en casi dos años. La tasa de reciclaje está aumentando un 17 por ciento al año.

David Appell

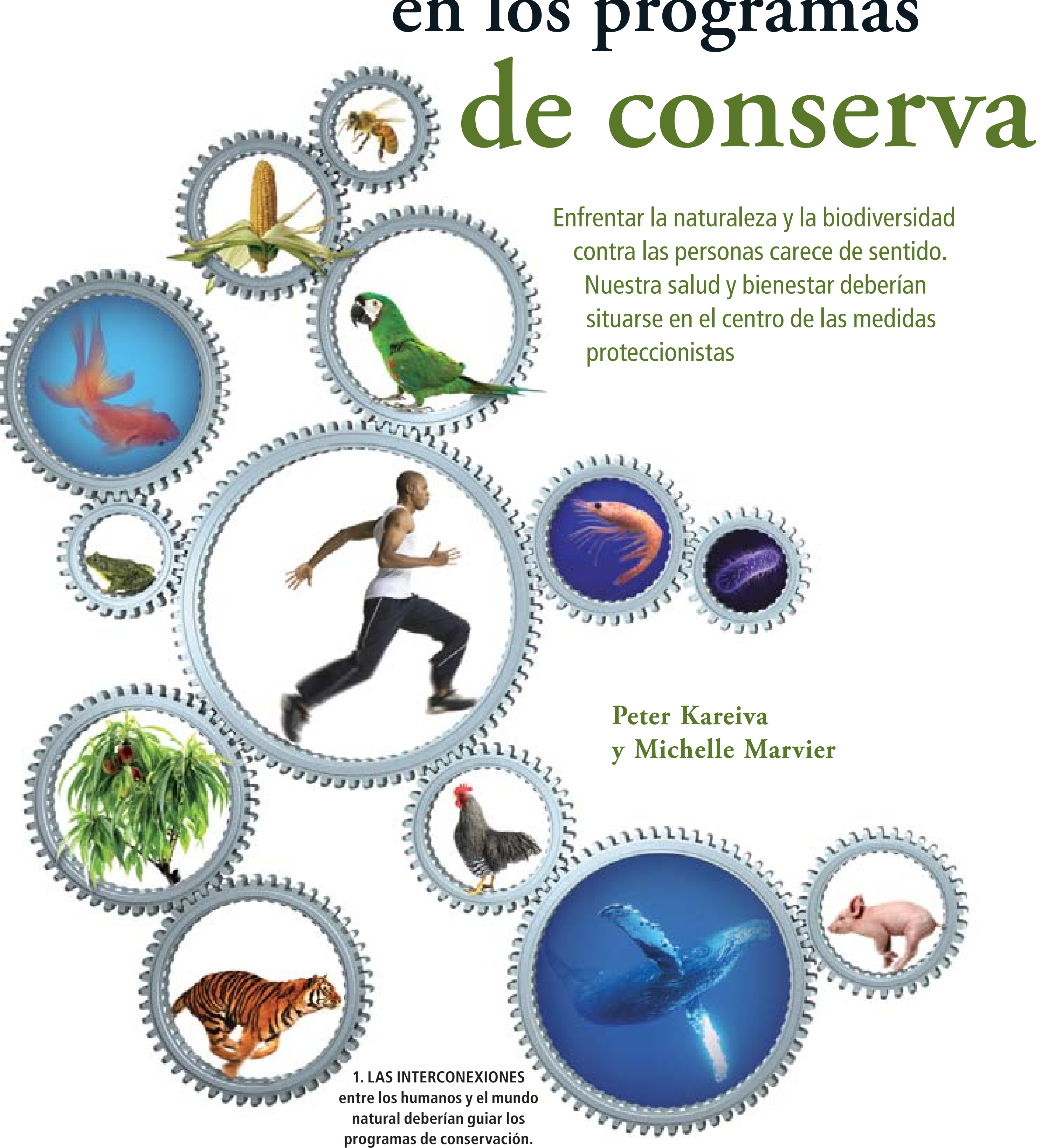
Y si se rompe una BFC...

Aunque las bombillas de bajo consumo contienen mercurio, cuando se rompa una de ellas en su hogar no será necesaria la visita de un equipo de bomberos especializado en sustancias peligrosas. Abra las ventanas para disipar los vapores de mercurio. Después, póngase guantes y utilice cinta adhesiva para recoger los pedazos pequeños y el residuo en forma de polvo del interior de la bombilla. Coloque la cinta y los fragmentos grandes de bombilla en una bolsa de plástico. Tras haber pasado la aspiradora, coloque la bolsa del depósito dentro de bolsas de plástico doblemente selladas antes de tirarla.

El hombre en los programas de conserva

Enfrentar la naturaleza y la biodiversidad contra las personas carece de sentido. Nuestra salud y bienestar deberían situarse en el centro de las medidas proteccionistas

Peter Kareiva y Michelle Marvier



1. LAS INTERCONEXIONES entre los humanos y el mundo natural deberían guiar los programas de conservación.





2. EL PARQUE NACIONAL DE KOMODO, en Indonesia, cuenta con el apoyo local porque genera ingresos mediante el cultivo de peces de arrecife y la venta de esculturas.

En 2004, la Unión Mundial para la Conservación (IUCN) añadió tres buitres a la lista de especies en grave peligro de extinción: el de pico largo (*Gyps indicus*), el de pico esbelto (*Gyps tenuirostris*) y el de dorso blanco (*Gyps bengalensis*). La población de esas tres especies, que a comienzos del decenio reciente de los noventa alcanzaba cerca de 40 millones de individuos en la India y Asia meridional, se había reducido en más del 97 por ciento. Las razones que se esgrimieron para salvar a esas aves responden a un discurso que nos resulta familiar: tenemos la obligación ética de salvar la biodiversidad del planeta por su valor intrínseco. Un razonamiento que podría trenzarse de otra manera, menos habitual.

Se tardó bastante en descubrir las causas genuinas de la caída de la población de buitres. Solía atribuirse a la pérdida de hábitat y a la contaminación. Hasta que, hace unos años, se observó que las aves morían por ingesta de un fármaco antiinflamatorio, el diclofenaco, que se administra al ganado. En los bóvidos y en los humanos, ese medicamento amortigua el dolor; en los buitres, provoca fallos renales. Con la desaparición de los buitres, cientos de miles de cadáveres de vacas, que suelen dejarse para las aves, se han podrido al sol, han incubado la bacteria carbuncosa (*Bacilus anthracis*) y han terminado convirtiéndose en pasto para los perros salvajes. Esa abundancia de alimento ha provocado el aumento de la población de perros cimarrones y, con ello, de la amenaza de la rabia. Así, el destino de los buitres puede hallarse ligado al de millones de personas: salvar de la extinción a esas aves protegería de enfermedades peligrosas a las personas.

Las relaciones entre el bienestar humano y la conservación de las especies en peligro de extinción no siempre son evidentes. Pero abundan tales nexos en la mayoría de las situaciones abordadas por los conservacionistas: los humedales y los manglares protegen los poblados frente a tormentas letales; los bosques y los arrecifes de coral proporcionan alimento e ingresos. El daño infligido a un ecosistema puede repercutir en otro a medio mundo de distancia, así como en las personas que dependen del mismo en razón de sus recursos o explotación turística.

Pese a dichas interrelaciones de dependencia, los programas de conservación de la biodiversidad acostumbran poner los requerimientos del mundo vegetal y animal por encima de las exigencias del hombre. Con el propósito de invertir esa tendencia —y para el bien de la humanidad y de los organismos amenazados— nosotros, y un grupo de conservacionistas cada vez mayor, afirmamos que ese criterio debe sustituirse por un enfoque que ponga el énfasis en la preservación de ecosistemas con valor para las personas. Nuestro plan salvará numerosas especies, al tiempo que protegerá la salud y los medios de vida del hombre.

Dragón de Komodo



CONCEPTOS BASICOS

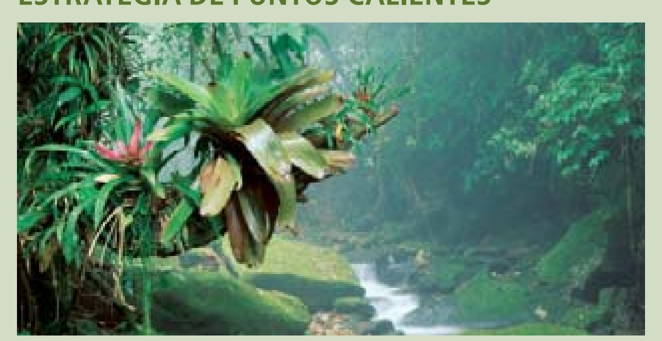
- Preservar la biodiversidad por sí misma, en particular en los puntos calientes, no constituye una estrategia eficaz de conservación.
- Los beneficios son mayores si nos centramos en la protección de ecosistemas vitales para la salud y las necesidades materiales del hombre.
- Además de bosques, los ecosistemas en cuestión incluirían humedales que mantienen el agua limpia, manglares que protegen frente a las tormentas y arrecifes de coral que sustentan pesquerías.
- La protección de esos enclaves entraña la conservación de la biodiversidad y asegura el bienestar de las poblaciones humanas.

JURGEN FREUND *Nature Picture Library (arrecife)*; JEZ O'HARE *(artesanos)*; JOE McDONALD *Corbis (dragón)*

HISTORIA DE DOS ESTRATEGIAS

Las estrategias de conservación centradas en los puntos calientes (*izquierda*) no ofrecen protección a la mayoría de los ecosistemas valiosos para la salud y el desarrollo humanos. Un proceder basado en los servicios ecosistémicos (*derecha*) cumpliría lo anterior y ofrecería un nuevo criterio de evaluación a la hora de establecer prioridades.

ESTRATEGIA DE PUNTOS CALIENTES



LA IDEA MATRIZ

Identificar áreas con destacada diversidad vegetal amenazadas; preservarlas, bajo el bien entendido de que se protege así toda una serie de animales, que a menudo son más difíciles de catalogar que las plantas. Hasta la fecha se han identificado 25 de tales puntos calientes, entre ellos el Parque Nacional de Bocaina, en Brasil (*arriba*).

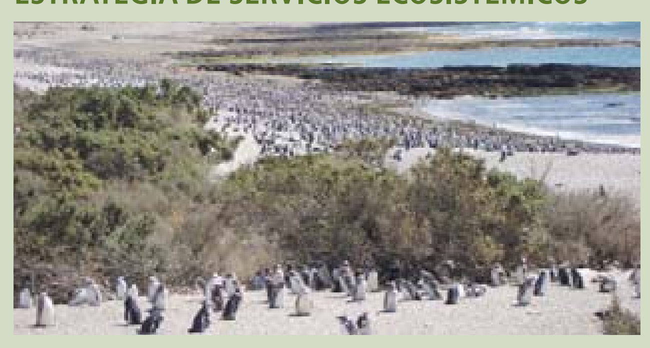
ENFOQUE TIPICO

Establecer un parque o reserva nacional para proteger la vida animal y vegetal. Disuadir a las personas de vivir en esas tierras o usarlas. Vigilar y hacer cumplir la normativa.

INCONVENIENTES

Las áreas ricas en especies vegetales no son necesariamente ricas en diversidad animal. Los pueblos locales suelen ser desplazados o pierden recursos importantes. Los puntos calientes no cuentan, por lo común, con la implicación ni el apoyo de la población.

ESTRATEGIA DE SERVICIOS ECOSISTEMICOS



LA IDEA MATRIZ

Dejar claro que las personas dependen de varios ecosistemas, como ocurre con los ingresos por turismo en Punta Tomba, Argentina (*arriba*); identificar ecosistemas que se hallan gravemente amenazados y cuyo deterioro perjudicará a los residentes locales.

ENFOQUE TIPICO

Allí donde los ecosistemas se están degradando, establecer un plan de conservación que proteja el ecosistema y beneficie a la comunidad humana que depende del mismo.

VENTAJAS

Cuando las personas comprendan que su salud y seguridad económica dependen de varios ecosistemas, apoyarán los proyectos de conservación. Ello favorecerá la conservación de la biodiversidad, pero no a expensas del hombre.

¿QUE SON LOS SERVICIOS ECOSISTEMICOS?

En un estudio global reciente, las Naciones Unidas identificaron cuatro tipos de servicios:

DE APROVISIONAMIENTO: ofrecen recursos alimentarios o genéticos

DE REGULACION: proporcionan control de inundaciones, modulación del clima y otras funciones similares

CULTURALES: ofrecen sentido de lugar, bienestar espiritual y otros beneficios inmateriales

DE APOYO: suministran los elementos básicos de un ecosistema; entre ellos, el ciclo de los nutrientes, la formación del suelo o la polinización

Fuera de los puntos calientes

La reputación misantrópica de la conservación obedece, en buena medida, a un fenómeno: millones de personas se han visto obligadas a abandonar su tierra o se les ha arrebatado su fuente de sustento por mor de la conservación de animales y hábitats. La controvertida decisión del presidente de Kenya, Mwai Kibaki, de devolver el Parque Nacional de Amboseli a sus habitantes originales, los masai, refleja el descontento creciente con esos desplazamientos forzados. El descontento es global. Cazadores y colonos de Asia y Africa afirman que las zonas protegidas limitan su dieta y sus ganancias. Los campesinos y madereros de los EE.UU. se muestran enojados ante las perspectivas de perder sus privilegios hídricos o sus puestos de trabajo por culpa de los salmones o de los mochuelos moteados.

La percepción pública de un escenario en que la naturaleza pugna contra las personas nace de las estrategias de conservación centradas en los puntos calientes. En 1988, Norman Myers, de la Universidad de Oxford, desarrolló el concepto de "punto caliente de biodiversidad". Por tal se entiende un área restringida que alberga una notable riqueza de especies vegetales endémicas, es decir, nativas y geográficamente confinadas. Myers basó su medida en la diversidad de esas plantas porque las listas de plantas constituían los datos más fiables —y a menudo los únicos disponibles— y porque se pensaba que la diversidad vegetal constituía un buen indicador de la diversidad animal. Myers y sus colaboradores, de la organización Conservación Internacional, identificaron hasta 25 puntos calientes (la región del *cerrado* en Brasil y el Cuerno de Africa, entre otros) donde aplicar los proyectos de conservación.

Las campañas de conservación precedentes se habían centrado en especies de especial atractivo popular: pandas, ballenas, focas, etcétera. En cambio, el concepto de puntos calientes proporcionaba un conjunto de criterios rigurosos y cuantificables mediante los cuales encauzar la inversión en conservación: un sistema de selección basado en el recuento de especies era más científico que el basa-

TUI DE ROY *Minden Pictures* (*izquierda*); GITAN JEAN (*derecha*)

do en fotografías de animales encantadores o emblemáticos. Parecía también un enfoque más realista y eficaz; las organizaciones conservacionistas poseen fondos limitados, que podrían invertirse ahora en enclaves donde se salvaría un número mayor de especies. Durante los últimos 15 años, esa ha sido la estrategia adoptada por organizaciones filantrópicas y multinacionales.

Aunque la expresión "punto caliente" resulta apremiante, la idea de biodiversidad que subraya no ha conseguido captar el interés de la población ni provocar su implicación. Una encuesta reciente demostraba que sólo el 30 por ciento de los estadounidenses habían oído hablar del término "biodiversidad". Entre los conservacionistas, los hay que procuran evitar la palabra, porque genera apatía o una respuesta negativa. Resulta evidente que los puntos calientes de biodiversidad no animan a la población a financiar la conservación ni a participar en ella.

Ni siquiera entre los científicos faltan detractores de los puntos calientes. C. David L. Orme, del Colegio Imperial de Londres, señaló en fecha reciente que podría tratarse de publicidad engañosa: en las localidades con numerosas especies de plantas nativas no tienen por qué abundar las especies de mariposas o de vertebrados. Marcel Cardillo, de la misma institución londinense, ha señalado que los animales de los puntos calientes florales no son los que corren mayor riesgo de extinción; esa distinción sí la ostentan, en cambio, los mamíferos de los bosques boreales y de las regiones árticas.

Otros biólogos han demostrado que muchas de las regiones con menor biodiversidad proporcionan hogares estacionales, paradas migratorias o lugares de nidificación de vital importancia. Medio millón de pájaros bobos de Magallanes se reúnen cada septiembre en la patagónica Punta Tomba, una zona seca de matorral donde medran escasas plantas endémicas, por lo que ni siquiera llega a "punto templado" de biodiversidad. Pero los pájaros bobos que allí anidan resultan básicos para la economía local, pues cada año acuden unos 70.000 turistas para su observación. Existen muchos lugares similares, localidades de escasa biodiversidad vegetal que, no obstante, resultan cruciales para especies de máximo interés ecológico o económico: trechos de tundra que mantienen a patos, cisnes y ánsares; ríos templados en los que frezan salmones.

Un paradigma de servicios

Los principios que guían la conservación deben renovarse. Aunque la sociedad quizá no comprenda el concepto de biodiversidad, sí que valora la naturaleza como fuente de alimento, energía, materiales de construcción, ocio e inspiración. Los ecólogos han empezado a cuantificar ese capital natural bajo el paraguas de los "servicios ecosistémicos", expresión que acuñó Paul R. Ehrlich y que ha promovido Gretchen C. Daily, ambos de la Universidad de Stanford. Esos servicios abarcan productos comercializables (medicinas, madera), así como procesos cuyo valor económico no suele considerarse: filtración de agua, polinización, regulación del clima, control de inundaciones y enfermedades y formación de suelo. Robert Costanza, de la Universidad de Vermont, y otros economistas se propusieron asignar un valor monetario a esos procesos: descubrieron que el valor anual de dichos servicios económicos sobrepasaba la suma del producto interior bruto de todos los países del mundo.

La idea de centrarse en los servicios ecosistémicos no es exclusiva del mundo académico. De una manera creciente, gobiernos y organizaciones no gubernamentales van admitiendo que la protección de dichos servicios constituye un fin prioritario. En 2000, las Naciones Unidas encargaron un estudio de los servicios ecosistémicos. Un año después, un equipo internacional de más de 1300 expertos emprendió una de las tareas más ambiciosas de la ecología: la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. El proyecto reseñaba el impacto que los humanos han ejercido sobre los servicios ecosistémicos en los últimos 50 años. Los servicios se dividieron en cuatro categorías: de aprovisionamiento (que suministran alimento, recursos genéticos u otros bienes), de regulación (que desempeñan funciones reguladoras,



3. LOS ECOSISTEMAS "SALVAVIDAS" son aquellos cuya conservación y restauración beneficiaría la vida de comunidades humanas. Constituyen, por tanto, prioridades de conservación. Los países con ecosistemas salvavidas que aquí se señalan se han identificado a partir de datos sobre pobreza, importancia de los recursos naturales para la economía y nivel de degradación del suelo.



4. LA DESAPARICION DE LOS BUITRES de la India tuvo consecuencias inesperadas para los humanos: aumentó la población de perros cimarrones carroñeros y, con ello, la amenaza de la rabia. La salvaguarda de los animales salvajes entraña, a menudo, la protección de los humanos. Abundan los nexos de ese tipo, entre la suerte que corren los animales salvajes y nuestra salud.

PAGINA 12: SAMUEL Y PEDRO VELASCO *5W Infographics*; DAVIES & STARR *Getty Images* (*maíz*); DON FARRALL *Getty Images* (*abeja y pez dorado*); GEORGE DOYLE Y CIARAN GRIFFIN *Getty Images* (*loro*); RUBBERBALL PRODUCTIONS/GETTY IMAGES (*hombre*); PURESTOCK/GETTY IMAGES (*camarón, gallo y rana*); MEDICALRFCOM/GETTY IMAGES (*microorganismo*); FLIP NICKLIN *Minden Pictures/Getty Images* (*ballena*); DIGITAL VISION/GETTY IMAGES (*cerdito*); JOSEPH VAN OS *Getty Images* (*tigre*); CREATIV STUDIO HEINEMANN *Getty Images* (*planta*); EN ESTA PAGINA: ANN SANDERSON (*arriba*); ASHOK JAIN *Nature Picture Library* (*buitres*)

PROTECCION DE HABITATS Y COMUNIDADES POBRES

EL PROBLEMA

Las marismas, las praderas de fanerógamas marinas y los bancos de ostras de la costa del golfo de Florida albergan manatíes, tortugas marinas, chorlitejos americanos y numerosas especies amenazadas más, al tiempo que sirven de guarderías para especies de importancia económica: camarones, cangrejos y pargos rojos. Esos hábitats proporcionan protección frente a las marejadas que acompañan a los huracanes, como el Dennis en 2004 (*derecha*). Pero los programas para la defensa y restauración de los ecosistemas costeros —que beneficiarían también a la población humana y expandirían los hábitats para las especies amenazadas y de interés comercial— se han ignorado en favor de proyectos ingenieriles que aceleran la erosión y la pérdida de hábitats.

LA SOLUCION

Expertos de la organización ecologista "The Nature Conservancy" y de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) han combinado en fecha reciente mapas de hábitats críticos y de especies amenazadas en el *panhandle* de Florida con mapas de previsión de marejadas de temporales y de las comunidades más sensibles a las tormentas (*debajo*). Mediante la superposición de esos conjuntos de datos, se identificaron áreas cuya restauración protegería de forma simultánea a las poblaciones humanas más vulnerables, así como a un gran número de las especies más importantes de la zona.









Chorlitejo americano

tales como el control de inundaciones), culturales (que proporcionan bienestar espiritual y otros beneficios inmateriales) y de apoyo (que contribuyen a la formación del suelo y de otros elementos básicos del ecosistema). A tenor de los resultados de la evaluación, la mayoría de los servicios ecosistémicos no sólo han menguado, sino que sufren una explotación insostenible.

El tsunami del océano Indico en 2004 y el huracán Katrina en 2005 pusieron de manifiesto la relación entre los ecosistemas y las condiciones de vida del hombre. En ambos casos, los daños se multiplicaron con la pérdida de la vegetación natural. La destrucción, a lo largo de los últimos 70 años, de unos 4000 kilómetros cuadrados de marismas y de praderas de fanerógamas marinas de Luisiana exacerbó la imponente marejada que generó el Katrina [*véase* "Deltas de zonas habitadas", de Mark Fischetti; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2001]. En el sudeste asiático, la conversión generalizada de los manglares costeros en estanques para camarones supuso la desaparición de un amortiguador de olas que hubiera protegido frente al tsunami. Estudios realizados con posterioridad a éste, dirigidos por Farid Dahdouh-Guebas, de la Universidad Libre de Bruselas, encontraron que las costas con manglares intactos apenas sufrieron daños.

Ni las marismas de Luisiana ni los manglares de Sri Lanka figuran entre los puntos calientes de biodiversidad mundiales. Sin especies de plantas endémicas reseñables, estimamos que el número de especies vegetales y animales que contienen no se acercan a la décima parte de las que medran en una pluviselva.

También los nexos entre pérdida de hábitat y pérdidas económicas —no siempre evidentes— revisten importancia. Los vientos que azotan el Sahara y el Sahel africanos, que no cesan de extenderse, transportan polvo hacia el oeste, sobre el océano Atlántico. Cada año, varios millones de toneladas de esa arena se depositan en las Américas o en el Caribe. Una vez allí, el polvo, los contaminantes, microorganismos y nutrientes que acompañan a la arena promueven la desaparición de los arrecifes de coral, con la reducción consiguiente del número de turistas y la caída de la actividad pesquera. El sobrepastoreo y las prácticas agrícolas insostenibles en el Africa del Norte y subsahariana han acentuado la pobreza, la hambruna y la desnutrición a escala regional, amén de arruinar corales y economías que se hallan a medio planeta de distancia.

Los beneficios económicos que proporcionan los servicios ecosistémicos resultan vitales para los países en vías de desarrollo. Esos países obtienen ingresos sustanciales de la madera, las fibras y la agricultura; los recursos forestales y pesqueros son de cinco a diez veces más importantes para la economía nacional de esos países que para los EE.UU. y Europa. Según un informe de las Naciones Unidas de 2005, la conservación del medio es clave para aliviar la

Los autores

Peter Kareiva y **Michelle Marvier** colaboran en el estudio de plantas transgénicas y de salmones en el Pacífico Noroccidental. Kareiva es director científico de la organización ecologista "The Nature Conservancy". Se dedica a la investigación y al asesoramiento de proyectos internacionales de conservación. Marvier enseña en la Universidad de Santa Clara, en California, donde dirige el Instituto de Estudios Ambientales.

ANN SANDERSON (*mapas*); JIM BRANDENBURG *Minden Pictures* (*chorlitejo*); MARI DARR WELCH *AP Photo* (*huracán*)

EL RESULTADO

Al demostrar que es posible combinar la preservación del medio y la atención a necesidades sociales, el equipo está empezando a recibir un mayor apoyo público para los proyectos de conservación y restauración a lo largo del *panhandle* de Florida.

Tortuga boba

Comunidades pobres, vulnerables ante los temporales

RESULTADO FINAL

Los conservacionistas pueden utilizar este mapa para decidir dónde concentrar los esfuerzos, de forma que ayuden a las personas y al mundo natural.

pobreza de los 750 millones de pobres rurales del mundo.

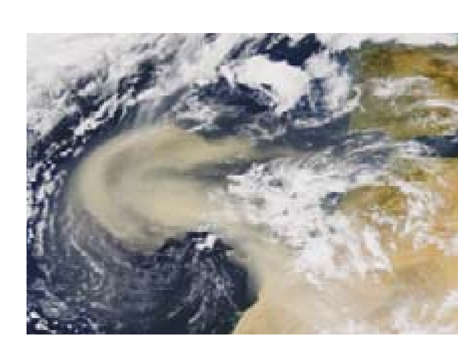
La propia salud humana se halla amenazada cuando se desbaratan los ecosistemas y los ciclos naturales. Los buitres de la India no constituyen más que un ejemplo entre cientos. Casi dos millones de personas mueren cada año por falta de agua potable. La conservación de los humedales y los bosques reduciría esa mortalidad: los humedales constituyen filtros naturales que mejoran la calidad del agua para consumo humano y para usos agrícolas; los bosques sanos retienen los sedimentos que por sí mismos enfangarían el agua. Salvaguardar bosques y praderas reduciría los penachos de polvo que se originan en Africa e incluso los de mayor tamaño que cruzan el océano Pacífico desde China occidental y que se han relacionado con un aumento de los casos de asma en Estados Unidos.

Hallamos una conexión más sutil entre la degradación de los ecosistemas y la salud humana en los organismos patógenos que se transmiten de animales salvajes a hombres. Dos tercios de las enfermedades mundiales emergentes (el virus Ebola y la gripe aviar, por ejemplo) son causadas por patógenos que infectan animales (huéspedes), que a su vez entran en contacto con los humanos debido a cambios en el uso del territorio y en las prácticas agrícolas. Pero no se trata sólo de enfermedades "exóticas". El exterminio de lobos y pumas causado por los habitantes de los EE.UU. orientales desencadenó una explosión en las poblaciones de ciervos y de las garrapatas de estos animales, que ha provocado más de 20.000 nuevos casos anuales de enfermedad de Lyme. Los intentos de erradicación de depredadores llevados a cabo hace más de un siglo han puesto en peligro la salud humana actual.

Conservación de balsas salvavidas

Nuestra propuesta centrada en los servicios ecosistémicos retoma, en cierto modo, las ideas de conservación tradicionales que ponen el énfasis en las interconexiones. Pero nuestro enfoque difiere en varios aspectos esenciales. En primer lugar, creemos que buena parte de los conservacionistas carecen de una concepción realista del estado del planeta. Deben dejar de aferrarse a una visión de la naturaleza en estado virginal. Cada día crece la población mundial en un cuarto de millón de personas. Aumentará la cifra de bosques y humedales transformados en tierras de cultivo y se elevará el número de especies oceánicas agotadas por la sobrepesca. La biodiversidad decae. No existe ya una naturaleza prístina separada de la influencia humana.

Puesto que nuestro ambiente consistirá, sobre todo, en sistemas influidos por el hombre, la protección de la biodiversidad debe llevarse a cabo en el contexto de paisajes que incluyan núcleos urbanos, agricultura intensiva y bosques y ríos gestionados, no sólo reservas naturales. No deja de resultar paradójico que las áreas protegidas deban, a buen seguro,



5. EL POLVO procedente de los ecosistemas de pradera degradados del Africa subsahariana es transportado por el viento hasta regiones remotas; ello daña los arrecifes de coral, el turismo y las pesquerías en el Caribe. La protección de ecosistemas críticos en una parte del mundo resulta beneficioso también para la gente que vive a un océano de distancia.

J. Y A. KOSTEN *Peter Arnold, Inc. (tortuga)*; NASA *(polvo)*

supervisarse intensamente para conservar su carácter "natural". Los gestores de numerosos parques naturales han acabado por reconocer esa realidad. El paisaje del Parque Nacional Kruger, en Sudáfrica, responde a un elevado grado de control: los abrevaderos naturales se han sustituido por pozos excavados y las poblaciones de elefantes se someten a entresaca para evitar el hacinamiento.

El segundo cambio importante que propugnamos es que los conservacionistas se centren en las regiones donde la degradación de los servicios ecosistémicos constituye una mayor amenaza para la población humana: los manglares de Asia, las marismas en los EE.UU. sudorientales, las tierras áridas del Africa subsahariana y los arrecifes de coral de todo el mundo. Ese proceder resultaría eficaz sobre todo allí donde las agencias gubernamentales y los grupos conservacionistas trabajan de forma conjunta para la protección de la población humana y conservación del hábitat. En este contexto, en el *panhandle* de Florida (la región de Florida que se adentra en el golfo de México), una asociación entre la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) y la organización ecologista "The Nature Conservancy", se propone identificar áreas de interés común para el bienestar de las personas y la conservación tradicional. La clasificación de los hábitats en términos de la capacidad para proteger a las comunidades humanas, amén de la biodiversidad, está sacando a la luz áreas donde urge la preservación.

En tercer lugar, los conservacionistas deberían colaborar más estrechamente con los expertos en desarrollo. En los dos últimos decenios, numerosos proyectos de desarrollo sostenible han procurado aunar los intereses de ambos grupos, pero con la atención puesta sólo en productos que ya se comercializan (peces, productos forestales no madereros, etcétera). No se atendía a la gama de servicios ecosistémicos. Mediante la combinación y la coordinación de la energía y el capital de las fuerzas de conservación y de los proyectos de bienestar humano, se mejoraría la eficiencia y el impacto de uno y otro empeño. Pensemos, por citar un ejemplo, que las inversiones necesarias para conseguir agua limpia y sin sedimentos suelen ser las mismas que ofrecen protección a la biodiversidad acuática.

Sin una conexión estrecha entre la conservación y los problemas sociales, es poco probable que las políticas de protección de la biodiversidad encuentren apoyo público. En 2004, Michael Shellenberger y Ted Nordhaus, de la compañía consultora American Environics, plantearon en un artículo titulado "La muerte del ambientalismo" que los grupos ambientalistas deben ir más allá de su tendencia a poner el medio natural en un contenedor hermético y alejado de las preocupaciones de los demás, si quieren que les hagan caso. En nuestra opinión, esa denuncia mordaz del ambientalismo resulta válida para el movimiento de conservación.

La eficacia de los procedimientos de conservación que proponemos ha de medirse no sólo por el número de especies protegidas, sino también por las mejoras en el bienestar de las personas. Esas evaluaciones ya han em-

PROTECCION DEL AGUA POTABLE

EL PROBLEMA

Gran parte del agua que abastece Quito procede del altiplano andino, que alberga una extraordinaria variedad de plantas y animales endémicos, entre ellos el cóndor de los Andes, majestuoso. Aunque se ha establecido una reserva para el cóndor (*fotografía*), apenas se cumple la normativa. Río abajo, el abastecimiento de agua es insuficiente en numerosas áreas alrededor de la ciudad; la mayoría de los cursos bajo registro llevan agua no potable. Ello se debe a unas prácticas agrícolas y forestales inadecuadas que se realizan en los aledaños de la reserva del cóndor y a los animales que pastan demasiado cerca del río y de los canales.



PETE OXFORD/*Nature Picture Library*

LA SOLUCION

En 2000, la Agencia estadounidense para el Desarrollo Internacional (USAID), la organización ecologista "The Nature Conservancy" y socios ecuatorianos locales establecieron un fondo para el agua. La compañía hidroeléctrica de Quito, la compañía cervecera Andina, la compañía de aguas potables de Quito y un impuesto del 2 por ciento a los residentes de la capital ecuatoriana proporcionan los ingresos. El fondo ha recolectado 4,9 millones de dólares para los proyectos de conservación, educación e hidráulicos aguas arriba de Quito.

EL RESULTADO

Hasta este año, se han contratado 11 nuevos guardas forestales para vigilar el área protegida; se ha emprendido un extenso programa educativo para enseñar a los agricultores mejores prácticas de uso del suelo. Se han plantado más de 3,5 millones de árboles para repoblar las cuencas hidrográficas deforestadas. Es todavía temprano para saber si las prácticas más sostenibles están produciendo las mejoras deseadas en la calidad del agua. Con todo, se está tejiendo una red de estaciones de control hidrológico. El apoyo público a los proyectos de conservación del agua ha crecido de forma espectacular.

PROTECCION DE LA VIDA SALVAJE

EL PROBLEMA

En Namibia, la etnia San, cuyos miembros reciben a menudo el nombre de bosquimanos, sufre marginación social, una pobreza extrema y una de las mayores tasas de retardo en el crecimiento infantil. Han sido desplazados de sus tierras comunales y, privados de toda forma sostenible de ganarse la vida, se han visto forzados a la caza furtiva y exterminadora. El rinoceronte negro, una de las especies más amenazadas del planeta, se ha convertido en una de sus víctimas.



LA SOLUCION

En 1996, el gobierno de Namibia aprobó una ley que concedía a los pueblos indígenas la propiedad de los animales de caza y todos los ingresos procedentes del turismo y la caza. Se establecieron reservas locales que cubrían el 17 por ciento del suelo del país y que incluían 60 comunidades, para gestionar la vida salvaje y seguir los movimientos de los animales. USAID proporcionó fondos para ayudar a los San a establecer esas reservas locales y participar en la gestión de las mismas.

EL RESULTADO

Allí donde las reservas locales se mantienen activas, la vida salvaje se está recuperando, con aumentos del 600 por ciento en las poblaciones de elefantes, cebras, órices y gacelas saltarinas. Namibia posee ahora la mayor población del mundo de rinocerontes negros en libertad. Al propio tiempo, se han creado para la población humana local más de 500 puestos de trabajo a tiempo completo y más de 3000 a tiempo parcial. En 2004, el turismo (*izquierda*) y la caza generaron 2,5 millones de dólares de ingresos. Ese caso ilustra, asimismo, algunos de los retos del enfoque conservacionista centrado en los servicios ecosistémicos: gran parte de la población San sigue marginada; algunos observadores aducen que debería darse a los pueblos indígenas la propiedad de la tierra, no sólo de la vida salvaje.

FRANS LEMMENS/*Peter Arnold, Inc.*

pezado. El gobierno indonesio y “The Nature Conservancy” se pusieron de acuerdo para establecer el Parque Nacional de Komodo en 1980. Con un doble objetivo: la protección del amenazado dragón de Komodo y la conservación de los bosques y arrecifes de coral. Las cuotas de entrada al parque se dedicaron a proyectos de desarrollo local y a nuevas fuentes de ingresos; entre éstas, cultivo de algas, turismo, tallas de madera y cría de peces de arrecife, muy valorados. Según una encuesta realizada en 2006 entre los lugareños locales que confinan con el parque de Komodo, la abrumadora mayoría apoyaba el área protegida en razón de los ingresos que generaba.

La preocupación acecha

Nuestro enfoque causa cierta alarma porque los servicios que proporciona la naturaleza no siempre se correlacionan con la biodiversidad. Un segundo motivo de preocupación resulta de la abundancia de las plantas y animales fundamentales para los servicios ecosistémicos y la economía humana. Lo que no obsta para que las especies raras desempeñen un papel crucial: el de seguro. Con las alteraciones que producirá el cambio climático y la modificación del territorio en su totalidad, las especies raras de hoy pueden convertirse en las especies abundantes de mañana; por tanto, debemos salvar tantas cuantas sea posible. En California, la abeja melífera europea, no nativa, es el polinizador de mayor interés agrícola. Si la población de abejas melíferas europeas se redujera de forma notable (recientemente se ha visto amenazada por ácaros introducidos), algunas de las abejas nativas menos abundantes podrían aumentar en número y convertirse en los principales polinizadores de plantas domésticas, una función del máximo interés económico.

Aunque sería moralmente reprobable que los humanos permitieran la extinción de todas las especies excepto las que proporcionan —o podrían proporcionar— servicios, caeríamos en un error si creyéramos en la posibilidad de un retorno de buena parte del planeta a su estado preindustrial. Algunas extinciones causadas por los humanos son inevitables; debemos ser realistas acerca de lo que podemos conseguir y lo que no. Tiene que asegurarse, ante todo, la conservación de ecosistemas en lugares donde la biodiversidad rinde servicios a los pueblos que lo necesitan.

Sugerimos que en vez de identificar las primeras 10 o 25 localidades que necesitan protección en términos de riqueza de plantas nativas, los conservacionistas se dediquen a la búsqueda de ecosistemas que operan a modo de “balsas salvavidas”: áreas con tasas elevadas de pobreza, donde una fracción notable de la economía depende de los sistemas naturales y donde los servicios ecosistémicos han caído en una grave degradación. Los esfuerzos de conservación dirigidos a proporcionar agua limpia, a reducir la erosión del suelo y a evitar la sobrepesca ayudarán a la gente y protegerán gran parte de la diversidad biológica, aunque no toda. Ese tipo de proyectos

Bibliografía complementaria

ECOLOGY FOR A CROWDED PLANET. M. Palmer *et al*. en *Science*, vol. 304, págs. 1251-1252; 28 mayo 2004.

HOW MUCH IS AN ECOSYSTEM WORTH? ASSESSING THE ECONOMIC VALUE OF CONSERVATION. Banco Mundial, 2005.

VALUING ECOSYSTEM SERVICES: TOWARD BETTER ENVIRONMENTAL DECISION MAKING. National Research Council. National Academies Press, 2005.

contarán con un respaldo público superior al que reciben la mayoría de los esfuerzos de conservación.

Mientras tanto, algunas organizaciones consagradas deben continuar dedicándose a la conservación de especies y lugares sin ninguna relevancia especial para el hombre. Centrarse en los servicios ecosistémicos no significa renovar totalmente los objetivos de conservación, sino ampliar el respaldo público y promover, dentro de lo posible, un cambio de enfoque.

Economía natural

Está por demostrar que la conservación de servicios ecosistémicos sea capaz de sostener el desarrollo económico. El futuro de los servicios ecosistémicos como estrategia de conservación podría depender de la inverosímil colaboración de ecólogos y expertos en finanzas. De hecho, buena parte del entusiasmo que despierta ese enfoque procede del sector empresarial. En noviembre de 2005, el Grupo Goldman Sachs anunció que desarrollaría en un marco de servicios ecosistémicos sus propias operaciones: una inversión de 1000 millones de dólares en energías renovables, la evaluación de sus proyectos en función del impacto en los servicios ecosistémicos y el establecimiento de un grupo de reflexión para la exploración de mercados verdes.

El Banco Mundial, por su lado, anima a los países para que adopten métodos de contabilidad verde, en los que los bienes económicos y las evaluaciones de productividad nacional incluyan medidas que reconozcan los servicios ambientales y ecosistémicos, y deduzcan la degradación que resulta de la contaminación o de la explotación destructiva. La valoración económica y la creación de mercados para los servicios ecosistémicos proporcionan un método para la cuantificación de la conservación a la que empresas y personas puedan referirse fácilmente, vale decir, una mejora respecto de las políticas basadas en especies simbólicas o endemismos vegetales.

Wangari Muta Maathai, premio Nobel de la Paz de 2004, Kofi A. Annan, ex secretario general de las Naciones Unidas, y otras voces autorizadas han llamado la atención hacia la conexión entre el ambiente, la prosperidad humana y la paz. Según Annan, nuestra lucha contra la pobreza, la desigualdad y la enfermedad guarda un nexo directo con la salud del propio planeta. Los conservacionistas deben oír y difundir ese mensaje. Los programas de conservación se harán globales de verdad y conseguirán un amplio apoyo público sólo cuando las personas resulten fundamentales para su misión.

Cuando hablamos de un momento grabado con fuego en el recuerdo, solemos hacerlo con un sesgo negativo: el asesinato del presidente Kennedy, la muerte de Diana de Gales, el 11-S. No es así con el lanzamiento del *Sputnik*, del que se cumplieron cincuenta años el pasado octubre. A muchos les preocupó que el adversario nuclear pusiese sobre sus cabezas una reluciente esfera. Pero el alba de la era espacial también supuso una esperanza. Los visionarios acogieron jubilosos el tan esperado salto fuera de la cuna de la humanidad y los pragmatistas pronto apreciarían los servicios de los satélites meteorológicos y de comunicaciones. Numerosos científicos e ingenieros de hoy sitúan el origen de la pasión de sus vidas en aquel punto que surcaba deprisa el cielo nocturno. "Durante los milenios que el hombre lleva mirando a las estrellas, nunca se enfrentó a un reto tan fascinante como el que el año 1957 le ha obligado de repente a aceptar", escribían los astrónomos Fred Whipple y J. Allen Hynek en el número de diciembre de 1957 de *Scientific American*.

EL FUTURO DE LA EXPLORACION ESPACIAL

Hace medio siglo, el lanzamiento del satélite soviético *Sputnik* inauguraba la era espacial. ¿Qué nos espera ahora?

La evolución del programa espacial sigue siendo espectacular. En diez años, apenas lo reconoceremos. La lanzadera, pese a todos sus defectos la máquina voladora más depurada jamás construida, pertenecerá ya al pasado. La NASA está empezando a trabajar en el proyecto Constellation, que, en líneas generales, no consiste sino en desempolvar, con la técnica de hoy, los cohetes y cápsulas del programa Apolo [*véase* "A la Luna y más allá", *en este mismo número*]. La lanzadera es una nave espacial ambiciosa para un fin modesto: el abastecimiento regular en órbita. La *Constellation* será una nave espacial modesta para fines ambiciosos: construir una base lunar, visitar un asteroide y establecer colonias humanas en Marte. Michael Griffin, el director de la NASA, sigue un curso, lento pero seguro, hacia objetivos que, sostiene, serán factibles con un presupuesto restringido. No pocos comentaristas hubieran deseado que sus predecesores hubiesen adoptado un enfoque así hace treinta años.

Las próximas décadas también prometen grandes cambios en las misiones robóticas. Completo ya el heroico reconocimiento inicial del sistema solar, las agencias espaciales cavan más hondo, entiéndase a veces al pie de la letra. La más importante de las preguntas, la de si estamos solos en el sistema solar, quizá no tenga todavía respuesta. Mundos que en tiempos se creyeron inhabitables, como las lunas de Júpiter y Saturno, podrían encerrar unas entrañas no hostiles a lo viviente. Acaso para el centenario del lanzamiento del *Sputnik* la actual línea divisoria entre los programas científicos humanos y robóticos se habrá casi borrado, conforme los astronautas se hayan ido haciendo cargo de trabajos de campo demasiado difíciles para las sondas mecánicas.

Pocas cosas les son más necesarias a ambas vertientes del programa espacial, la humana y la científica, que la estabilidad. Los vaivenes presupuestarios de los últimos años, así como los cambios en las preferencias globales, han desembocado en callejones sin salida y despilfarros. En el segundo artículo de este informe especial se exponen las prioridades de los científicos planetarios. Misiones de esa misma magnitud surtirán a *Investigación y Ciencia* de artículos de astronomía, cosmología y física en años venideros.

De no ser por la Era Espacial, hoy tendríamos un mundo distinto. No todo ha sido positivo, pero, echadas las cuentas, hemos salido ganando. Si hoy planificamos bien, en 2057 se volverá decir lo mismo.

—Steven Ashley y George Musser





1. **PANELES SOLARES** captan la energía del astro mientras el vehículo de exploración tripulado *Orion* de la NASA orbita alrededor de la Luna, en una recreación artística.

A LA LUNA Y MAS ALLA

El hombre vuelve a la Luna. Esta vez con intención de quedarse algún tiempo

Charles Dingell, William A. Johns y Julie Kramer White

La Luna, un disco luminoso en el negro firmamento, aparece de repente sobre la amplia convexidad del horizonte terrestre. Los cuatro astronautas de la cápsula tripulada *Orion* han contemplado tan espectacular salida de la Luna varias veces durante los tres días que lleva su astronave orbitando, a 300 kilómetros sobre la Tierra. Pero ahora el piloto está listo para acelerar la nave hacia el lejano satélite por medio de un bien sincronizado impulso de cohete. Llega el aviso por los cascos: "En 10 segundos encendido de inyección translunar...". "Cinco, cuatro, tres, dos, uno, ya... ignición...": por la tobera del cohete, en el extremo de popa, emergen llamaradas incandescentes. La nave entera —una sucesión de módulos funcionales— se estremece con violencia, de camino ya hacia nuestro vecino celeste más próximo, ese lugar aún misterioso que los humanos no hemos visitado desde hace casi medio siglo. Estamos en 2020 y los estadounidenses se disponen a volver a la Luna. Pero esta vez con el propósito no sólo de ir y volver, sino de establecer una cabeza de puente para una nueva generación de exploradores espaciales.

La cápsula *Orion* es un componente clave del programa Constellation, ambicioso proyecto de la NASA, que costará muchos miles de millones, de construir un sistema de transporte espacial capaz no sólo de llevar el hombre a la Luna y traerlo de vuelta, sino también de reabastecer la Estación Espacial Internacional y hasta de llevar personas a Marte. Desde que a principios de 2006 se enunció el programa, ingenieros e investigadores de

STEPHEN C. HARTMAN

la NASA y de Lockheed-Martin, contratista principal de la *Orion*, vienen trabajando en el desarrollo de los lanzadores cohete, los módulos de la tripulación y de servicios, las etapas superiores y los sistemas de aterrizaje necesarios para que EE.UU. pueda organizar una campaña de vuelos espaciales tripulados, sólida y económicamente viable, para cuando su actual vehículo, la lanzadera espacial, se jubile en 2010.

A fin de minimizar los riesgos y los costes de desarrollo, los responsables de la NASA basan el programa Constellation en los aspectos técnicos bien probados y en los conocimientos prácticos adquiridos durante el programa Apolo, una proeza de la ingeniería que llevó el hombre a la Luna a finales de los años sesenta y principios de los setenta. Pero, a la vez, se está rediseñando cada sistema y cada componente para dotarlos de técnicas actuales.

La *Orion* arranca con unas funciones en general casi iguales a las de las naves *Apolo* y su cápsula de tripulantes tiene una forma parecida, pero la semejanza acaba ahí. La sonda admite más tripulantes que la *Apolo*. En las misiones lunares viajarán cuatro personas en una cabina presurizada, con un volumen de 20 metros cúbicos (los viajeros serán seis en las visitas a la estación espacial, que se iniciarán alrededor de 2016). En las *Apolo,* eran tres los astronautas, alojados en un exiguo volumen de unos seis metros cúbicos, compartido con los diversos aparatos.

Los últimos avances en diseño estructural, electrónica, informática y telecomunicaciones permitirán a los ingenieros dotar a la nueva nave de una flexibilidad operativa mayor que la de las *Apolo*. La *Orion*, por ejemplo, podrá atracar automáticamente en otros ingenios y permanecer en órbita lunar durante seis meses sin nadie a bordo. Asimismo, se están ampliando los márgenes de seguridad. En caso de una emergencia durante el lanzamiento, un potente cohete de escape apartará rápidamente del peligro a la tripulación, ventaja de la que no disfrutan los astronautas de la lanzadera. Mas, para comprender mejor el proyecto, empecemos en el suelo, antes de que *Orion* abandone la Tierra. Seguiremos el desarrollo de una misión lunar prototípica y consideraremos las técnicas pensadas para cada etapa.

Ascender y alejarse

El lanzador de dos etapas *Ares V*, preparado para despegar, descuella 110 metros sobre las marismas del Centro Espacial Kennedy de Florida. Es un vehículo no tripulado, con cinco potentes motores cohete. Tiene casi la misma altura y apariencia que un *Saturno V*, el famoso y enorme cohete del proyecto Apolo. El tanque central del *Ares V* —derivado del tanque externo de la lanzadera espacial— abastece de propulsante líquido de oxígeno-hidrógeno a los dos motores RS-68 del vehículo, versiones modificadas, a su vez, de los motores del lanzador militar y comercial *Delta IV*. Los dos cohetes auxiliares adosados, adaptados del sistema de la lanzadera espacial, que se ven en los costados del cilindro central del vehículo darán el empuje adicional necesario para que pueda alzar el vuelo, cargado con el alunizador (un ingenio insectiforme cuyo nombre provisional es *Artemis*) y con la "etapa de salida de la Tierra" —un módulo de propulsión, dotado de un motor J-2X alimentado por combustible líquido oxígeno-hidrógeno (descendiente del J-2, motor del *Saturno V* en la era Apolo)— que permitirá a la *Orion* escapar de la gravedad terrestre y viajar a la Luna.

De pronto, de la cola del *Ares V* sale un fogonazo. Le siguen borbotones de nubes de humo que envuelven el cohete, la plataforma y la torre de lanzamiento. Tras una pausa momentánea, el puerto espacial se estremece con un enorme estruendo que pone en fuga a las aves en todas las direcciones. El inmenso cohete asciende, primero lentamente, sobre una columna de gases de escape blanquecinos y grisáceos que se hincha más y más. Acelerando sin parar, deja una estela humeante y desaparece en la bóveda celeste. Minutos después, en el silencio del espacio inmediato a la Tierra, el *Ares V* se desprende de los cohetes adosados, que caen al mar, del que serán rescatados. A continuación, se desprende la cubierta protectora del morro y queda al descubierto el módulo de alunizaje. Girando en torno al planeta a una altitud de 300 kilómetros, la nave robot espera ya el siguiente paso de su excursión lunar: el encuentro con la *Orion*.

Ese mismo día, en otra plataforma del Centro Kennedy, los cuatro astronautas viajeros a la Luna aguardan a 98 metros de altura su inminente lanzamiento. Bajo la cápsula cónica que los alberga, hay un módulo de servicios cilíndrico. Lleva el motor de propulsión en órbita de la nave y gran parte del sistema de soporte vital. Cápsula y módulo están cubiertos por carenas que los protegen de las intensas fuerzas aerodinámicas y duras condiciones que encontrarán durante el ascenso. La cápsula de los tripulantes y el módulo de servicios van montados en el extremo superior del lanzador de dos etapas *Ares I*. Más esbelto que su hermano mayor, el "Poste", como lo llaman algunos, consta de un cohete de propulsante sólido, modificado del de la lanzadera (construido por Alliant Techsystems), sobre el que

LO ESENCIAL DE LA *ORION*

La NASA y Lockheed Martin están desarrollando un sistema de transporte espacial que, en el año 2020, llevará personas a la Luna en viajes de ida y vuelta. El vehículo *Orion* —que contiene una cápsula presurizada, sistemas de soporte vital y un motor de propulsión— es uno de los ejes esenciales del programa Constellation, que incluye también cohetes lanzadores y módulos de apoyo.

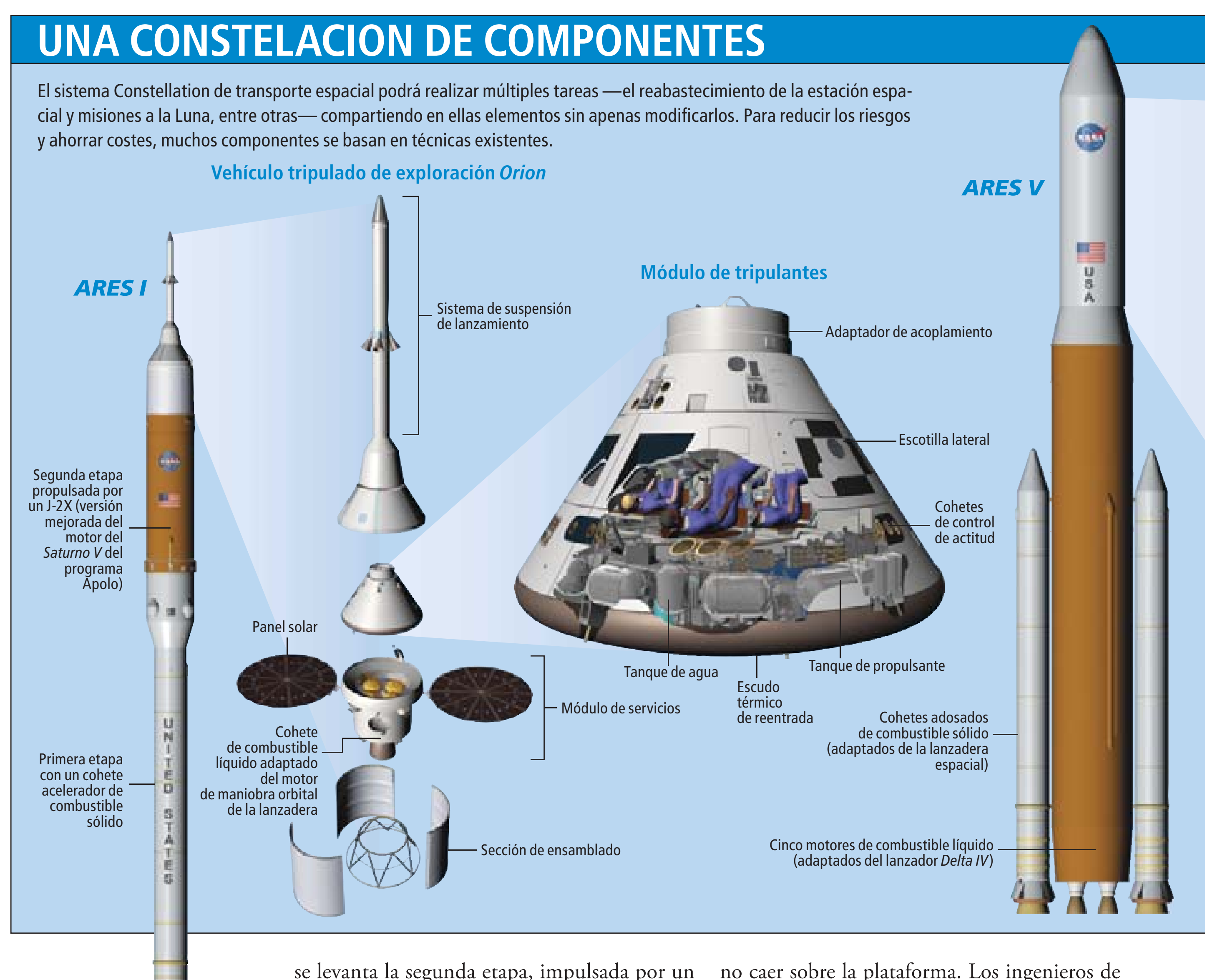
Aunque el programa Constellation-Orion se asemeja en varios aspectos al programa lunar Apolo de hace cuarenta años, podrá realizar, aparte de excursiones selenitas, otras misiones tripuladas y sin tripular; entre ellas, atender a la estación espacial y, quizá, viajar a Marte.

La flexibilidad mejorada del sistema Constellation procede de su tamaño mayor y diseño menos específico, y del uso de técnicas de vanguardia.

PAG. 23: TODAS LAS IMAGENES CORTESIA DE LA NASA EXCEPTO: MARINA DE LOS EE. UU. (explosión del Vanguard, a la derecha del todo, 2ª fila desde arriba); ESA (ExoMars, segunda izquierda 6ª fila desde arriba)

UNA CONSTELACION DE COMPONENTES

El sistema Constellation de transporte espacial podrá realizar múltiples tareas —el reabastecimiento de la estación espacial y misiones a la Luna, entre otras— compartiendo en ellas elementos sin apenas modificarlos. Para reducir los riesgos y ahorrar costes, muchos componentes se basan en técnicas existentes.



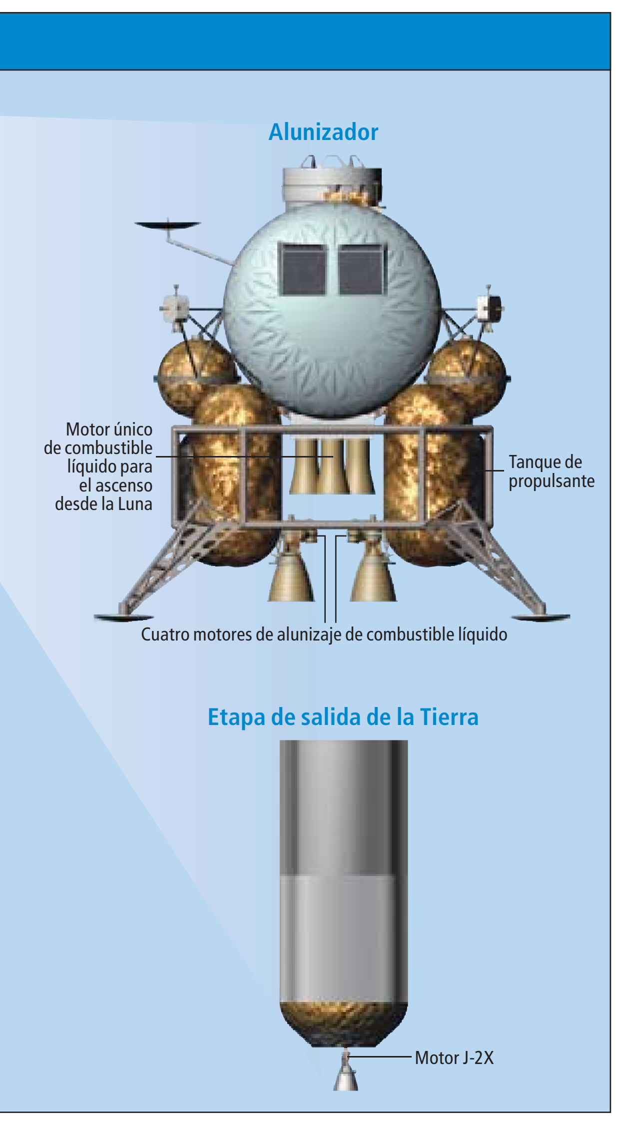
se levanta la segunda etapa, impulsada por un único motor J-2X. Un adaptador une la nave *Orion* y el *Ares I*.

La torre de escape que remata el conjunto está lista para eyectarse con los tripulantes, alejando a éstos del peligro en caso de avería. Tal como demostró el accidente de la *Challenger* en 1986, las probabilidades de salvación de las tripulaciones de la lanzadera son escasas si la nave sufre un problema técnico de importancia durante el lanzamiento e inicio del ascenso. En cambio, el sistema de aborto del lanzamiento de la *Orion* puede impartir, en segundos, un empuje equivalente a unas quince veces la suma de su propio peso y el de la cápsula de tripulantes. La torre cohete situaría al instante a los astronautas fuera de la zona peligrosa si se abortase la misión aún en la plataforma de lanzamiento o en el ascenso. De surgir en tierra algún problema técnico, el sistema eyectado alcanzaría una altura de 1200 metros, para facilitar el despliegue de un paracaídas, y una distancia horizontal de unos 1000 metros, para no caer sobre la plataforma. Los ingenieros de la misión estiman que el sistema de suspensión del lanzamiento, combinado con el sistema avanzado de guía y mando de la *Orion*, podría recuperar ilesa a la tripulación 999 veces de cada 1000 que se le requiriese.

Mientras la cuenta atrás se acerca a cero, el comandante y el piloto observan atentamente los instrumentos de vuelo en los visualizadores de pantalla plana de la "cabina de vidrio" de la *Orion*, que adapta una versión de seguridad reduplicada del sistema aviónico utilizado en los reactores de línea más modernos, como el Boeing 787 Dreamliner. Un astronauta de la era Apolo apenas si reconocería la cabina, con sus mandos computadorizados, que actúan mediante señales exclusivamente eléctricas, su equipo eléctrico de bajo consumo y su escaso número de conmutadores mecánicos.

Una sacudida estremece la estructura y se oye un estruendo ensordecedor. El Poste inicia su ascensión. Cobra velocidad a cada segundo y oprime a los astronautas contra sus asientos.

STEPHEN C. HARTMAN



A los dos minutos y medio de vuelo, el cohete de combustible sólido impulsa al *Ares I* a la velocidad de 6 Mach. Alcanzados los 61.000 metros de altitud, la primera etapa se separa y cae a la Tierra, suspendida de unos paracaídas para que se pueda recuperarla y reciclarla. Mientras tanto, se enciende el motor cohete J-2X de la segunda etapa. Transportará el módulo de tripulantes, el módulo de servicios y el sistema de suspensión del lanzamiento hasta los últimos confines de la atmósfera. Inútiles ya fuera de ésta, las carenas aerodinámicas se desprenden; esa pérdida de peso maximiza el rendimiento ascensional. La velocidad adquirida por la nave basta para reducir el riesgo de un aborto de emergencia, por lo que el sistema de suspensión del lanzamiento y sus cubiertas protectoras se sueltan también y caen. El motor de la segunda etapa deja de funcionar cuando las cápsulas de la tripulación y de servicios se acercan a los 100 kilómetros de altitud.

ANN SANDERSON (*gráfica*)

Encuentro en órbita terrestre

Se enciende entonces el motor de la cápsula de servicios, para completar la puesta en órbita de la *Orion* e iniciar las maniobras del encuentro con la etapa de escape de la Tierra y el alunizador. El motor principal de *Orion* es una adaptación del motor de maniobra orbital de la lanzadera espacial, bien probado en vuelo, aunque con prestaciones mejoradas en empuje y rendimiento. El módulo de servicios contiene sistemas de generación y acumulación de energía, radiadores (que expelen al espacio el calor sobrante), todos los fluidos necesarios y un compartimiento de equipos científicos. Para optimizar el espacio en el módulo de tripulantes, el módulo de servicios alberga también parte del sistema de aviónica, así como parte de los subsistemas de control ambiental y de soporte vital. Su liviana estructura está formada por un panal de material compuesto polimérico (“composite”), reforzado con aluminio. Se trata de un artículo fungible abaratado por unos métodos de fabricación sencillos.

Una de las diferencias más notables entre la *Orion* y la *Apolo* es la adición al módulo de servicios de unos dispositivos solares en forma de sombrilla. Se despliegan en órbita cuando se necesita. Como la nave *Apolo* se diseñó para misiones lunares que duraban sólo unos días, llevaba pilas de combustible de hidrógeno, capacitadas para generar electricidad sólo durante períodos cortos. La *Orion*, en cambio, deberá poder generar electricidad al menos durante seis meses.

Poco a poco, la nave *Orion* alcanza el alunizador y la etapa de escape que el *Ares V* ya había puesto en órbita terrestre baja. Cuando finalmente ambos ingenios se encuentran, la tripulación ejecuta (o vigila) las últimas maniobras sin perder de vista el sistema automático de “captura suave”, que alinea ambos vehículos y los acopla sin brusquedades. Componentes de retroalimentación dinámica y electromecánicos detectan las cargas, capturan automáticamente los anillos de apareamiento de los vehículos y amortiguan las fuerzas de contacto. Nave y tripulación ya están casi listos para dirigirse a la Luna.

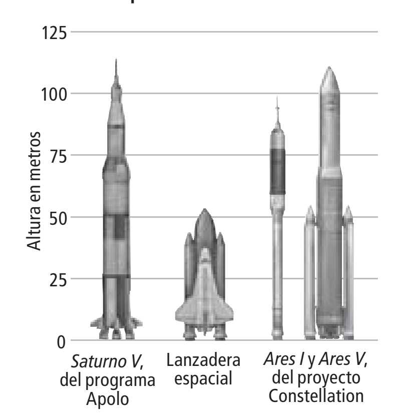
El módulo de tripulantes es el único elemento de la *Orion* que hará todo el viaje. Puede reutilizarse diez veces. Su estructura está hecha en su mayor parte de una aleación ligera de aluminio y litio reforzada con titanio. El exterior aparece revestido de un sistema de protección térmica que, además de proteger los habitáculos del abrasador calor de la reentrada, incorpora una capa dura resistente a los impactos; sirve de escudo frente a los velocísimos micrometeoritos y otros escombros que incidan contra la superficie exterior.

Los autores

Charles Dingell, William A. Johns y **Julie Kramer White** dirigen operaciones de ingeniería y técnicas del proyecto Orion de NASA/Lockheed. Dingell es director técnico del proyecto en nombre de la NASA, institución donde ha participado en la lanzadera espacial, el vehículo tripulado de retorno X-38 y los programas del avión espacial orbital. Johns es ingeniero jefe y director técnico del vehículo tripulado de exploración *Orion* en nombre de Lockheed-Martin, contratista principal del proyecto. Inició su carrera en Martin Marietta en 1980; trabajó en versiones sucesivas de la etapa superior del cohete Centauro y posteriormente dirigió el desarrollo del vehículo lanzador desechable *Atlas V* modificado. Kramer White es ingeniera jefe en nombre de la NASA del proyecto del vehículo tripulado de exploración *Orion*. Cuenta con más de 20 años de experiencia en la gestión técnica de la lanzadera espacial, la estación espacial y el X-38.

LOS SISTEMAS DE LANZAMIENTO UNO JUNTO A OTRO

Desde finales de los años sesenta, la NASA ha puesto en servicio tres sistemas de lanzamiento orbital para misiones tripuladas.





VIAJE A LA LUNA

El programa Constellation de la NASA comprende un conjunto de cohetes de lanzamiento, vehículos espaciales y módulos de apoyo que se combinarán para situar personas en la Luna en 2020. Según la misión, los astronautas permanecerán en la superficie lunar entre cuatro días y más de seis meses.

1 Un lanzador de carga *Ares V* despega con la etapa de escape de la Tierra y el alunizador. Al agotarse el combustible del cohete, la etapa de escape de la Tierra se propulsa a sí misma y propulsa el alunizador hasta una altitud de unos 300 kilómetros.

2 Poco después despega el *Ares I* (el "Poste"). Va a llevar a cuatro astronautas, el vehículo tripulado de exploración *Orion* y el módulo de servicios a una órbita terrestre baja similar.

3 La *Orion* se encuentra con la etapa de escape de la Tierra y el alunizador.

4 Propulsada por la etapa de escape de la Tierra, la nave espacial se dirige a la Luna. Tras consumirse el cohete, la tripulación se deshace de la etapa de escape de la Tierra.

5 Cuando la *Orion* llega a la Luna, cuatro días después, el motor del alunizador refrena la nave, que entra en órbita lunar.

6 La tripulación pasa al alunizador y desciende a la superficie, dejando a la *Orion* vacía girando en torno a la Luna. Los astronautas exploran la superficie.

7 La etapa de ascenso del alunizador devuelve la tripulación a la órbita, donde se acopla a la *Orion*. Los astronautas retornan al módulo de tripulantes y desechan la etapa de ascenso.

8 El motor del módulo de servicios impulsa a la *Orion* de vuelta a la Tierra.

9 Cuatro días después, los astronautas se desprenden del módulo de servicios. El módulo de tripulantes, protegido por su escudo térmico, entra en la atmósfera.

10 El descenso del módulo de tripulantes es frenado por paracaídas. Amortiguada por petos de aire, la nave espacial toma tierra en el oeste de EE.UU.

STEPHEN C. HARTMAN

El sistema de maniobra del módulo de tripulantes quema propulsantes gaseosos de oxígeno y metano. Se basa en los avances logrados en el programa del vehículo X-33 de etapa única para la puesta en órbita, abandonado por la NASA en 2001. Una ventaja de los sistemas de propulsión con oxígeno y metano estriba en que el combustible no es tóxico (a diferencia de sus predecesores, que usaban propulsantes hipergólicos), lo cual garantiza la seguridad de las tripulaciones de vuelo y de tierra tras el retorno a la Tierra.

Cuando todo se halla listo, se enciende el motor cohete de la etapa de salida de la Tierra, para propulsar la nave hacia la Luna. Se está configurando la *Orion* de forma tal, que valga para "misiones lunares de incursión" y para "misiones lunares de avanzada". En las primeras, los tripulantes pasarán de cuatro a siete días en la superficie lunar con el propósito de demostrar la capacidad de *Orion* de transportar y depositar humanos en la superficie de nuestro satélite. Las "misiones lunares de avanzada" establecerían allí una presencia humana parcialmente continua. Como la estancia más larga de una tripulación en la superficie lunar sería de 210 días (duración determinada por las reservas disponibles de oxígeno, agua y otros consumibles), la capacidad de actividad ininterrumpida de la sonda deberá exceder ese período. El principal elemento condicionante del diseño de las misiones lunares *Orion* es la cantidad de propulsante necesaria para cumplir esos objetivos.

Tras un viaje de cuatro días rumbo al espacio exterior, la tripulación entra en órbita lunar. Por el camino se ha deshecho de la etapa de escape de la Tierra. Los cuatro astronautas abordan el alunizador y dejan a la espera en órbita las cápsulas de tripulantes y de servicios. Como el módulo de excursión lunar *Apolo*, el alunizador consta de dos secciones. Una es la etapa de descenso, dotada de patas que soportan el artefacto sobre la superficie, así como la mayoría de los consumibles y equipo científico de la tripulación. La otra sección es la etapa de ascenso, que alberga a la tripulación. Tras alunizar y explorar la superficie, los cuatro expedicionarios despegan con ella de la superficie lunar y se acoplan a los módulos de tripulantes y de servicio que permanecían en órbita. La etapa de ascenso del aterrizador se expele hacia el espacio exterior y la *Orion* enciende el motor para volver a la Tierra.

De vuelta a casa

Mientras los astronautas de la nave *Orion* se aproximan al planeta azul, acaso tengan que prepararse para una reentrada y un aterrizaje muy diferentes de los usuales en las *Apolo*. Lo mismo que sus predecesoras *Geminis* y *Mercurio,* las *Apolo* amerizaban. Pero como los amerizajes requieren costosas flotas de buques de rescate y exponen a una astronave reutilizable a la corrosión salina, los ingenieros de la NASA quizá decidan que la *Orion* llegue a tierra firme, como las *Soyuz* soviéticas. El aterrizaje aminora, además, los costos de mantenimiento del ingenio. Pero el tamaño, peso e impulso mayores de la *Orion* agravan las dificultades técnicas. Si la agencia opta por el amerizaje, la sonda tendrá unas características operativas casi iguales a las de las naves *Apolo*.

Por desgracia, aterrizar en suelo norteamericano tras una misión lunar presenta una dificultad esencial. Durante casi la mitad del mes lunar, las condiciones orbitales sitúan todos los lugares de toma de tierra en el hemisferio sur, lejos de los emplazamientos que se tienen pensados en el oeste del territorio occidental de EE.UU. Aunque el momento en que se abandone la órbita lunar puede cambiar el punto de reentrada, la latitud de éste la fija la declinación (distancia angular desde el ecuador) de la Luna con respecto a la Tierra en el momento de dicha salida. Así pues, para llegar a lugares de aterrizaje del oeste de EE.UU., o en aguas cercanas, durante los períodos desfavorables del mes lunar, la nave *Orion* desplazará su punto de aterrizaje hacia el hemisferio norte, valiéndose del impulso aerodinámico que se producirá cuando descienda sobre la atmósfera superior de la Tierra. A una trayectoria de este tipo, en la que una nave espacial va rebotando en la atmósfera superior como una piedra que

ASTROFISICA ASTRONAUTICA

La NASA ha seleccionado cuatro estudios teóricos que podrían desembocar en experimentos que los astronautas de la* Orion *montarían al llegar a la superficie lunar.

Dos de esos estudios teóricos, propuestos, por separado, por la Universidad de Maryland en College Park y por el Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA, se proponen determinar la distancia de la Tierra a la Luna con una precisión submilimétrica.

Un científico del Laboratorio Naval de Investigación propone una instalación radiotelescópica en la otra cara de la Luna para estudiar la aceleración de las partículas elementales en las supernovas, los cuásares y la corona solar.

Un investigador del Centro Goddard ha diseñado un dispositivo que mediría las emisiones de radiación X blanda producidas por el núcleo galáctico y por las interacciones entre el viento solar y el campo magnético terrestre.

RETOS PARA LOS INGENIEROS



Prueba de caída del peto de aire

- SISTEMA DE ATERRIZAJE SUAVE: Se está desarrollando un sistema de petos de aire (*arriba*) que se infla debajo del modulo de tripulantes de la *Orion* para suavizar la sacudida del aterrizaje en suelo duro, en caso de que se opte por ello. Pero si los petos de aire se muestran inadecuados, hay varias alternativas en marcha; entre ellas, los retrocohetes.
- SOLUCIONES DE COMPROMISO: Los ingenieros deben dar con el mejor equilibrio entre las masas máximas que los cohetes de los *Ares* pueden mover, por una parte, y la combinación de márgenes de seguridad más amplios, máximas redundancias del sistema y máxima utilidad de los espacios para tripulantes, por otra.
- ESCUDO TERMICO: Aunque los ingenieros son partidarios de PICA (ablativo de carbono con impregnación fenólica) como material para el escudo térmico, la construcción de una estructura de ese tamaño podría plantear problemas. Como sustitutos valdrían las losetas de la lanzadera espacial o el material ablativo de la cápsula *Apolo*.

CENTRO DE INVESTIGACION LANGLEY DE LA NASA

rebrinca en una superficie de agua, se la llama reentrada con rebote.

Habiendo pasado los cuatro días del viaje de regreso afinando la trayectoria de vuelo de la *Orion* para la primera maniobra tripulada de reentrada con rebote jamás intentada, entre los astronautas aumenta la excitación conforme en la pantalla crece más y más la vista azul y blanca del planeta de donde salieron. Pero pronto tienen que ocuparse en reorientar la nave para soltar el módulo de servicios, una operación necesaria que deja expuesto el escudo protector térmico de la cara inferior del módulo de tripulantes. Después, tras emplear el sistema redundante de navegación y los ordenadores de vuelo de la cápsula para comprobar que la orientación de ésta es la adecuada para la reentrada y que la trayectoria sigue la ruta de incidencia en ángulo pequeño correcta, la tripulación se prepara para la aparición de las fuerzas de deceleración en cuanto la *Orion* entre en la atmósfera.

La entrada con rebote se inicia lentamente. Primero, la tripulación nota unas débiles fuerzas G, o de inercia, debidas a la resistencia del muy poco denso aire de las grandes altitudes. Las fuerzas G, que comprimen a los tripulantes contra sus asientos, se van haciendo paulatinamente más intensas mientras ante las ventanas pasan veloces trozos incandescentes de material del escudo antitérmico y chorros de gas ionizado. A poco de que la nave haya empezado a rozar contra los confines de la atmósfera superior, el ingenio rebota hacia una altitud mayor. Tras el brinco, la cápsula se zambulle a fondo en el aire camino de su lugar de aterrizaje.

2. PARA PROBAR UN MATERIAL con que construir el escudo térmico de reentrada, un arco eléctrico —un soplete del tamaño de una habitación— proyecta aire caliente a varios miles de grados sobre una muestra en el Centro de Investigación Ames de la NASA.



CENTRO DE INVESTIGACION AMES DE LA NASA

La trágica pérdida en 2003 de la lanzadera espacial *Columbia* y su tripulación puso de manifiesto la extrema importancia del sistema de protección térmica de los vehículos de regreso. La reentrada en la atmósfera genera un terrible calentamiento en la cara inferior de los ingenios espaciales (un par de miles de grados) a causa del rozamiento del aire, cuya velocidad relativa es hipersónica. Como la velocidad de reentrada de una *Orion* en misión lunar será un 41 por ciento mayor que la de una lanzadera en descenso desde una órbita terrestre baja, deberá aguantar una carga térmica varias veces mayor. Que el módulo de tripulantes de la *Orion* sea mayor que el de una *Apolo* redobla la dificultad.

Para el escudo térmico inferior de la *Orion* se piensa en PICA (un material ablativo de carbono con impregnación fenólica). Se trata de una matriz de fibras de carbono inmersas en una resina fenólica. A temperaturas elevadas, la superficie externa de la capa de PICA sufre ablación: se funde y el material que se desprende se lleva consigo gran parte del intensísimo calor. Con el calor, la superficie del ablativo se piroliza y deja una capa termorresistente de material carbonizado. Además, la baja conductividad térmica del PICA impide la transmisión de calor al módulo de tripulantes. Se usó este material por primera vez en 2006, como protector del ingenio espacial Stardust (que transportaba una muestra procedente del cometa Wild 2) en su regreso a la Tierra a 13.000 metros por segundo, la reentrada controlada más rápida hasta la fecha. Al ser su superficie 40 veces mayor, el escudo térmico de la *Orion* tendrá que construirse en segmentos, complicándose así más las cosas.

Aterrizaje

Finalmente, tres paracaídas —muy parecidos a los empleados en las misiones Apolo— se despliegan para aminorar la velocidad de descenso del vehículo. La tranquilizadora visión de las voluminosas campanas rojas y blancas informa a los astronautas de que su asombroso viaje ya casi ha terminado. Al cabo de poco, al soltarse el escudo térmico, la nave sufre una sacudida. Suspendido de los enormes paracaídas, el módulo de tripulantes desciende ya a sólo unos ocho metros por segundo.

Si el vehículo aterriza en el suelo, en su cara inferior se inflarán petos de aire que absorberán y amortiguarán el inevitable golpe al tomar tierra. Con una sacudida viva, la nave al fin se posará en el desierto occidental norteamericano. La *Orion* habrá vuelto a casa.

Bibliografía complementaria

Página Web del vehículo tripulado *Orion* de Lockheed Martin: **www.lockheedmartin.com/wms/findPage.do?dsp=fec&ci=17675**

Sitio Web del programa Constellation de la NASA: **www.nasa.gov/mission_pages/constellation/main/index.html**

Sitio Web de la Visión de la Exploración del Espacio de la NASA: **www.nasa.gov/mission_pages/exploration/main/index.html**



CINCO TAREAS ESENCIALES EN EL ESPACIO

Los científicos planetarios han enunciado diversos objetivos de la exploración del sistema solar

George Musser

A UN NIÑO DE LA ERA ESPACIAL, los libros que tratan del sistema solar anteriores a 1957 le resultan de lo más imprecisos. Qué poco se sabía entonces.

No se tenía ni idea de los grandes volcanes y cañones de Marte, a cuyo lado el Everest es una colina gastada y el Gran Cañón de Colorado, una zanja. Conjeturaban que debajo de las nubes de Venus podía haber una jungla exuberante y brumosa, o quizás un desierto seco y baldío, o un océano de agua con gas o un gigantesco pozo de alquitrán, cualquier cosa, menos lo que realmente hay: un enorme páramo volcánico, como la inundación del diluvio universal, pero de roca fundida. Las imágenes de Saturno eran bastante tristes: dos vagos anillos donde hoy día observamos cientos de miles de finas divisiones. Las lunas del planeta gigante se mostraban como mosquitos que flotasen a su alrededor; hoy conocemos sus contorsionados paisajes de lagos de metano y géiseres de polvo.

Por esas fechas, los planetas, puros manchones de luz, parecían mundos muy pequeños. Y al mismo tiempo la Tierra parecía mucho mayor de lo que de verdad es. No se la había visto nunca como planeta, una canica azul sobre terciopelo negro, bañada en un frágil barniz de agua y aire. No se sabía que la Luna nació de un impacto ni que los dinosaurios murieron de forma repentina. Se ignoraba que la humanidad se estaba convirtiendo en una fuerza geológica que cambia el entorno a escala global. Se valore como se valore la contribución de la era espacial, no cabe duda de que ha enriquecido nuestra visión de la naturaleza y nos ha proporcionado una perspectiva que ahora damos por sentada.

Desde las misiones Sputnik, la exploración planetaria ha atravesado altibajos. Del decenio de los ochenta podría decirse que fue la cara oscura de la Luna. El presente se nos ofrece más brillante: docenas de sondas de distintos programas espaciales surcan el sistema solar, desde Mercurio hasta Plutón. Pero los recortes de presupuestos, los costes excesivos y la poca claridad de los propósitos arrojan sombras sobre la NASA. Cuando menos, cabe decir que está atravesando el período de transición más inestable desde que hace 35 años Nixon pusiera fin a las misiones Apolo a la Luna.

"La NASA sigue luchando por su propia identidad", en palabras de Anthony Janetos, del Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico y miembro de un comité de Consejo Nacional de Investigación de Estados Unidos que inspeccionó el programa de la NASA sobre la observación de la Tierra. "¿Qué se pretende? ¿Realizar viajes tripulados, hacer ciencia, llegar al espacio exterior, explorar el sistema solar, centrarse en lanzaderas y estaciones espaciales o conocer nuestro planeta?"

En principio, la convulsión actual corresponde a días felices. No sólo hay sondas robóticas por doquiera. El programa espacial de vuelos tripulados ya no va a la deriva como un cohete agotado. El presidente George W. Bush anunció en 2004 un objetivo claro y atractivo: pisar suelo lunar y marciano. Aunque polémico, el anuncio dio a la NASA algo hacia lo que apuntar. Lo malo es que con esa orden no ha llegado el dinero. La agencia ha tenido que romper la barrera que siempre había protegido, aunque fuese de manera imperfecta, a los programas científicos de los gastos excesivos de los vuelos tripulados, y viceversa. "Ya me imagino que no es noticia para ustedes que la NASA no cuente con financiación suficiente para todo lo que se le ha pedido", como ha declarado Bill Claybaugh, director de la División de Estudios y Análisis de la NASA. El dinero tampoco sobra en las agencias espaciales de otros países.

NASA, ESA Y J. HESTER Y A. LOLL *Universidad estatal de Arizona*

Los comités del Consejo Nacional de Investigación se preguntan de vez en cuando por el curso de la exploración astronáutica. La lista de objetivos que se mencionan a continuación resume sus prioridades.

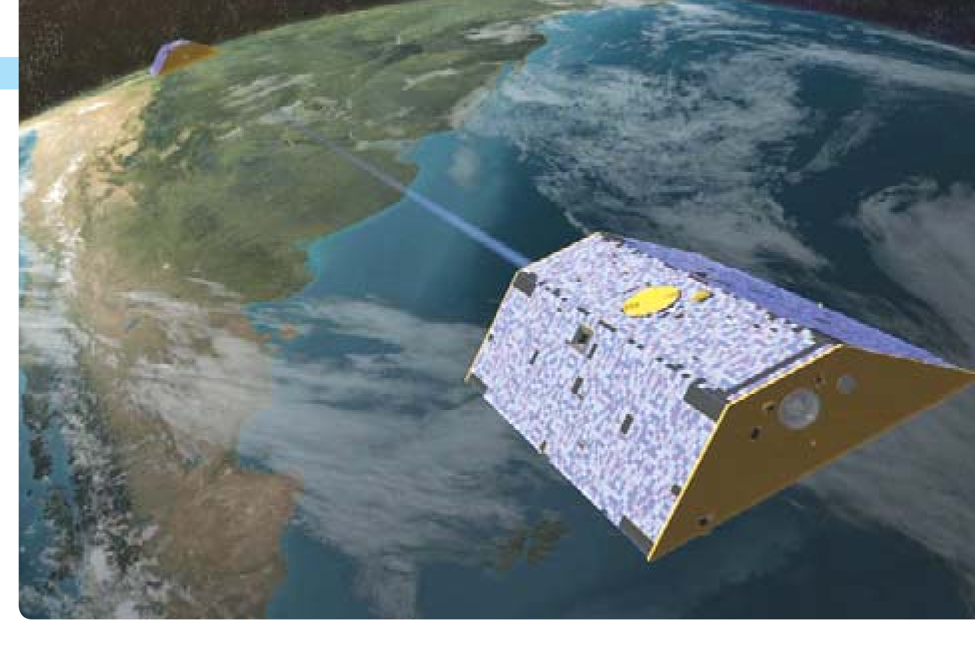
1 Observación continua del clima de la Tierra

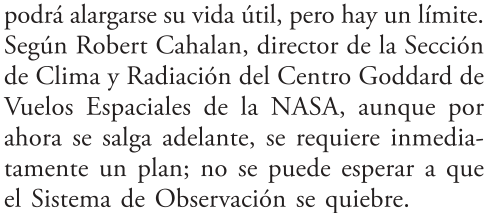
En medio de la emoción por llegar a Marte o rasgar el velo de Titán, a veces se da por supuesto que alguien se encarga de la tarea, prosaica pero urgente, de mirar por nuestro planeta. La NASA y la Administración Nacional para los Océanos y la Atmósfera (NOAA), sin embargo, se han despreocupado de ello. En el año 2005, el comité del Consejo Nacional de Investigación del que era miembro Janeto comentó que "el sistema de satélites medioambientales corre peligro de descomponerse". La situación se ha deteriorado aún más. La NASA ha desviado en los últimos cinco años 600 millones de dólares del programa sobre ciencias de la Tierra hacia la estación espacial y las lanzaderas. Mientras tanto, la construcción de la nueva generación de sistemas de satélites medioambientales de órbita polar ha sobrepasado con creces el presupuesto; ha habido por ello que eliminar instrumentos esenciales para el estudio del calentamiento global, así los que habrían medido la radiación solar entrante y la radiación infrarroja emergente.

En consecuencia, las dos docenas de satélites del Sistema de Observación Terrestre están alcanzando el final de su existencia antes de que los sustitutos estén preparados. Se cree que podrá alargarse su vida útil, pero hay un límite. Según Robert Cahalan, director de la Sección de Clima y Radiación del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA, aunque por ahora se salga adelante, se requiere inmediatamente un plan; no se puede esperar a que el Sistema de Observación se quiebre.

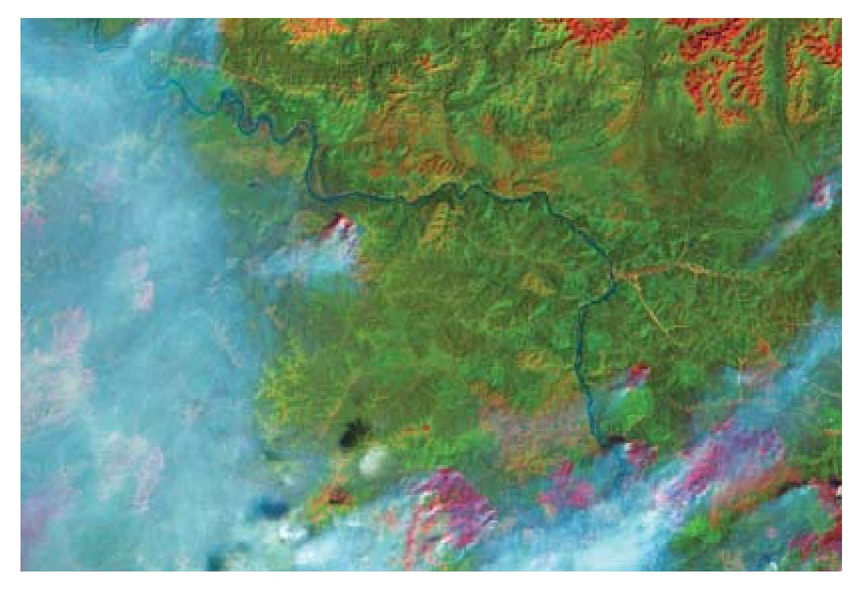
Si un satélite expira antes de que llegue su sustituto, se producirán huecos en los datos y será más difícil analizar las tendencias. Por ejemplo, si un nuevo instrumento descubriese que el Sol brilla más de lo que había medido su predecesor, ¿se debería a un mayor brillo real del Sol o a una mala calibración de uno de los dos instrumentos? A menos que ambos satélites coincidiesen en el tiempo, no se podría distinguir entre lo uno y lo otro. La venerable serie de los Landsat, que había medido la superficie desde 1972, lleva años funcionando mal; el Departamento estadounidense de Agricultura ha tenido ya que comprar los datos de satélites indios para el seguimiento de la productividad agrícola. En el caso de algunos tipos de datos, ningún otro país puede proporcionar la información.

El panel del Consejo Nacional de Investigación solicitó el restablecimiento de la financiación perdida, con lo que se cubrirían hasta 17 nuevas misiones de aquí a diez años, entre ellas las encargadas de vigilar las capas de hielo y los niveles de dióxido de carbono, fundamentales para predecir el cambio climático y sus efectos. La raíz del problema, no obstante, es que las observaciones del clima están a caballo entre la observación rutinaria del clima (especialidad de la NOAA) y la ciencia de vanguardia (especialidad de la NASA). Nadie se ocupa del seguimiento del clima, asegura el climatólogo Drew Shindell, del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA. Como él, otros investigadores sugieren que los diversos programas gubernamentales estadounidenses sobre el clima se fusionen en una sola agencia.





1. LOS SATELITES GEMELOS GRACE (Recuperación Gravitatoria y Experimento Climático), que detectan las distorsiones gravitatorias causadas por el movimiento del agua, han sobrepasado ya el tiempo de vida que se les calculó en un principio.



2. ESTA IMAGEN DEL *LANDSAT 7*, tomada a varias longitudes de onda, muestra incendios del año 2004 en Alaska y en Yukón (región al noroeste de Canadá). Un fallo limitó en 2003 las prestaciones del satélite. El programa Landsat lleva más de diez años recibiendo dinero con cuentagotas.

NASA/JPL (*arriba*); IMAGEN DE JESSE ALLEN, DATOS PROCEDENTES DEL CENTRO DE DATOS USGS EROS (*abajo*)

PLAN DE ACTUACION

- Financiar los 17 nuevos satélites propuestos por el Consejo Nacional de Investigación para los próximos diez años (coste estimado: 500 millones de dólares al año).
- Fundar una agencia del clima.



Preparar una defensa contra los asteroides

Al igual que el seguimiento climatológico, la protección del planeta contra los asteroides parece caer siempre en saco roto. Ni la NASA ni la Agencia Espacial Europea (ESA) han creado un plan para evitar la extinción de la Humanidad. A lo más que se ha llegado es al proyecto Spaceguard Survey de la NASA, que, con un presupuesto de 4 millones de dólares por año, rastrea el espacio cercano a la Tierra en busca de cuerpos de más de un kilómetro de tamaño, que pueden causar, no ya una destrucción local, sino una hecatombe mundial. Sin embargo, no se ha efectuado ninguna búsqueda sistemática de destructores regionales, de menor tamaño; se cree que unos 20.000 podrían, en principio, golpear nuestro planeta. No existe ninguna oficina de grandes rocas espaciales que evalúe la situación de peligro y llame al teléfono rojo en caso de urgencia. Se necesitarían unos 15 años o más para preparar una defensa contra un cuerpo externo, suponiendo que la técnica adecuada estuviera lista, y no es el caso.

El pasado mes de marzo, a petición del Congreso de Estados Unidos, la NASA publicó un informe que podría servir de punto de partida de un plan exhaustivo. De su análisis se deduce que la búsqueda de cuerpos de 100 a 1000 metros está al alcance del telescopio “Gran Sondeo Sinóptico”, en construcción por un consorcio de astrónomos y empresas (Google la más famosa). Entre los objetivos está la exploración del cielo para detectar cualquier cosa que se mueva o parpadee. Un informe presentado por el proyecto cree que podría encontrar el 80 por ciento de esos cuerpos en los primeros 10 años de operaciones, de 2014 a 2024. Con una cantidad adicional de 100 millones de dólares para ajustes finos, se rastrearía un 90 por ciento de esos cuerpos.

Al igual que cualquier instrumento situado en tierra, el telescopio sinóptico presenta dos limitaciones. La primera, sus puntos ciegos: los cuerpos que se encuentran justo por delante o por detrás de la órbita de la Tierra —precisamente los más peligrosos— sólo se observan al anochecer o al amanecer, cuando se pierden en el resplandor de la luz solar. La segunda, que el instrumento estima la masa de los asteroides de manera indirecta, a partir de su brillo. Al observar en luz visible, las estimaciones son sólo fiables en un factor dos: un asteroide grande pero oscuro puede parecerse a un asteroide pequeño aunque brillante. Esa diferencia revestiría interés cuando se juzgase que habría que intervenir, afirma Claybaugh.

Para cubrir tales deficiencias, el equipo de la NASA está considerando la construcción de un telescopio infrarrojo espacial de 500 millones de dólares, que se pondría en órbita alrededor del Sol. De esa manera, el telescopio observaría cualquier amenaza sobre la Tierra y, como se estudiarían los cuerpos en distintas longitudes de onda, se mediría la masa con un 20 por cierto de error.

La otra cuestión es la de qué hacer en el caso de que un asteroide se nos acercara. En primera aproximación, para desviarlo un radio terrestre, habría que cambiar su velocidad en un milímetro por segundo una década antes de su llegada, lo que se podría conseguir golpeándolo, bombardeándolo con armas nucleares, empujándolo o remolcándolo gravitatoriamente. En el año 2004, el panel asesor de las misiones de objetos próximos a la Tierra de la ESA recomendó la ejecución de un experimento, denominado *Don Quijote*, que costaría 400 millones de dólares: disparar un proyectil



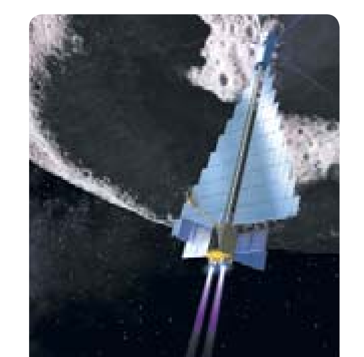
3. UNA IMAGEN APOCALIPTICA: un asteroide como el que mató a los dinosaurios llegaría, desde la superficie del mar, hasta la altura de crucero de los vuelos comerciales.

ASTEROIDES AMENAZADORES

Asteroides como el que se supone que acabó con los dinosaurios, de 10 kilómetros de diámetro, golpean la Tierra, en promedio, una vez cada 100 millones de años. Asteroides capaces de una devastación mundial, de un kilómetro o mayores, llegan una vez cada medio millón de años, más o menos. Los que podrían destruir una ciudad, de unos 50 metros de diámetro, caen una vez por milenio.

El proyecto *Spaceguard Survey* de la NASA ha encontrado algo más de 700 objetos de tamaño kilométrico. Ninguno de ellos representará una amenaza en los próximos siglos. El ritmo de los descubrimientos está disminuyendo; de lo que se desprende que el proyecto habría identificado el 75 por ciento de esos objetos.

La probabilidad de que un objeto del 25 por ciento restante se convierta en una amenaza real es pequeña, pero si ocurriese las consecuencias serían enormes. Estadísticamente, el riesgo equivale a la muerte de unas 1000 personas al año. Los asteroides más pequeños matarían en promedio a 100 individuos al año.



4. CON TIEMPO SUFICIENTE, incluso una nave modesta puede apartar de una trayectoria peligrosa a una roca muchísimo mayor que ella.

REUTERS/CORBIS (*arriba*); JPAT RAWLINGS SAIC (*abajo*)

de 400 kilogramos a un asteroide y observar las consecuencias.

Los escombros expulsados por el impacto ejercerían una fuerza sobre el asteroide —como la acción y reacción de los gases de escape de un cohete—, pero se desconoce su intensidad. Averiguarla constituye el objetivo de la misión. Se apuntaría a un objeto en una órbita alejada para que ningún escombro adquiriera una trayectoria de colisión contra la Tierra.

La ESA terminó los estudios de viabilidad la primavera pasada. Mas no ha tardado en archivarlos debido a la falta de presupuesto. Habría que unir los esfuerzos de la ESA con los de la NASA o la Agencia Japonesa de Exploración Espacial (JAXA), o con los de ambas, para que semejante plan se llevase a cabo.

PLAN DE ACTUACION

- **Extender la búsqueda de asteroides hasta cuerpos más pequeños, posiblemente con un telescopio infrarrojo espacial.**
- **Desviar un asteroide de manera controlada como primer experimento.**
- **Constituir un sistema oficial que evalúe cualquier amenaza.**



3 La búsqueda de otra vida

Antes de las misiones Sputnik, se pensaba que el sistema solar era un auténtico jardín del Edén. Después, la ilusión desapareció. Se demostró que los mundos hermanos de la Tierra eran infernales, Marte incluido, al revelarnos las sondas *Mariner* un paisaje lunar repleto de cráteres y no encontrar, los *Viking* que se posaron allí ni una simple molécula orgánica. Pero recientemente se han multiplicado los hallazgos de lugares propicios para la vida. Volvemos a mirar a Marte con esperanza. Los satélites de los planetas exteriores, sobre todo Europa y Encélado, parecen tener extensos mares subterráneos y mucha materia prima para la vida. Cabe la posibilidad de que Venus haya estado cubierto de agua, alguna vez.

6. EXOMARS es el todoterreno que la Agencia Espacial Europea enviará a Marte, donde se posará en 2014. A bordo llevará una plataforma perforadora y un laboratorio biológico. Reanudará la búsqueda directa de vida, en punto muerto desde las misiones Viking de mediados de los años setenta.



5. LOS GLOBOS DE AIRE CALIENTE son un medio ideal de acceder a Titán. Una fuente de energía de plutonio proporciona suficiente calor a un globo de 12 metros para transportar 160 kilogramos de instrumentos y viajar a una altitud de 10 kilómetros.

En cuanto a Marte, la NASA busca pruebas de una habitabilidad pasada o presente y no los propios organismos vivos. Su última misión, Fénix, despegó en agosto y debería llegar a la inexplorada región polar norte a mediados del año que viene. No se trata de un todoterreno móvil, sino de un vehículo de aterrizaje fijo, con un brazo robótico que excava en la superficie unos pocos centímetros para analizar los depósitos someros de hielo. El siguiente paso de la Agencia es el Laboratorio Científico de Marte, un todoterreno del tamaño de un coche y un coste de 1500 millones de dólares cuyo lanzamiento está previsto para finales de 2009. Llegará al planeta un año más tarde.

Poco a poco, sin embargo, se querrá retornar a la búsqueda directa de organismos vivos o de sus restos. Para el 2013, la ESA proyecta lanzar el vehículo *ExoMars*, equipado con un laboratorio químico parecido al del *Viking* y, lo que es muy importante, con un taladro capaz de perforar dos metros bajo la superficie; debería bastar para atravesar las capas superficiales tóxicas y alcanzar lugares donde el material orgánico podría haber sobrevivido.

Aparte de estos dos proyectos, no hay nada más. La prioridad de la mayoría de los científicos planetarios —no ya por lo que se refiere a la búsqueda de vida, sino en la exploración en general del sistema solar— es traer algunas rocas y polvo marcianos a la Tierra para su análisis. Aun una pequeña cantidad revelaría en buena medida la historia del planeta, como hicieron las muestras traídas de la Luna por los *Apolo*. Las cuitas presupuestarias de la NASA han obligado a retrasar esta misión, que costaría muchos miles de millones de dólares, para el 2024 como muy pronto, si bien en el verano pasado brillaron algunos destellos de luz al empezar la agencia a pensar en modificar el Laboratorio Científico de Marte para que almacene muestras, que luego se recuperarían.

En cuanto a Europa, lo principal es enviar un satélite artificial que mida las alteraciones del campo gravitatorio y la forma de esta luna inducidas por las mareas que provoca Júpiter. Si hay un océano, la superficie subirá y bajará unos

TIBOR BALINT (*arriba*); ESA (*abajo*)

30 metros; si no, apenas cambiará un metro. Las lecturas magnéticas y los radares de superficie podrían también buscar agua subterránea, y las cámaras fotografiarían la superficie para preparar el aterrizaje de futuros vehículos y perforadoras.

Y para Titán, la continuación natural de la actual misión Cassini sería otro satélite artificial en órbita, más un vehículo que tomase muestras de la superficie. La atmósfera de Titán, muy parecida a la de la Tierra, abre la posibilidad de que un globo de aire caliente descendiese a la superficie de vez en cuando para recoger rocas y polvo. "Se perseguiría, afirma Jonathan Lunine, de la Universidad de Arizona, analizar el contenido orgánico de la superficie para ver si existen trazas sistemáticas e indicadoras de una autoorganización incipiente, pues así se piensa que comenzó la vida en la Tierra."

El pasado mes de enero la NASA empezó a considerar la realización de las misiones mencionadas. Escogerá entre Europa y Titán el año que viene; una sonda de unos dos mil millones de dólares volaría a uno u otro dentro de una década. El cuerpo que no sea seleccionado tendrá que esperar diez años más.

Al final, pudiera ocurrir que sólo hubiera vida en la Tierra. Aunque resultaría desalentador, no todo el esfuerzo habría sido en vano. La astrobiología, según Bruce Jakosky, director del Centro de Astrobiología de la Universidad de Colorado, no se restringe a la simple búsqueda de vida; se propone evaluar hasta qué punto podría haber otras formas de vida, qué condiciones han de darse para su existencia y de qué modo surgió hace cuatro mil millones de años en nuestro planeta. Por tanto, la búsqueda de vida persigue no sólo el descubrimiento de otros seres vivos en el cosmos, sino el conocimiento de nuestros propios orígenes.

PLAN DE ACTUACION

- Retomar la idea de recoger muestras marcianas.
- Acelerar los programas encaminados a visitar a Europa y Titán.

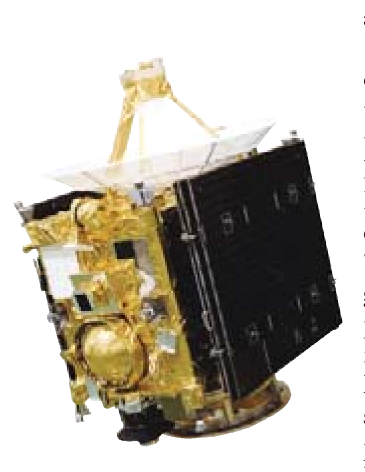
4 La génesis de los planetas

Al igual que el origen de la vida, la génesis de los planetas fue un proceso complejo, con fases diferenciadas. Júpiter nació primero y fue guía de los otros. ¿Tuvo un nacimiento lento, como el de los demás planetas? ¿Se constituyó mediante un simple colapso gravitatorio, como una estrella pequeña? ¿Se formó más lejos del Sol y luego se desplazó hacia el interior, según indica su alto contenido en elementos pesados, en cuyo caso habría eliminado de su camino a otros mundos menores? El satélite Juno de la NASA, que saldrá hacia Júpiter en 2011, podría aportar algunas respuestas.

Quienes investigan la formación planetaria quieren también que la misión Stardust tenga una continuación. Trajo el año pasado muestras del coma de polvo que rodea el núcleo sólido de un cometa. El jefe del equipo, Donald Brownlee, de la Universidad de Washington, explica que apenas se ha arañado la superficie. "*Stardust* demostró que los cometas fueron grandes colectores de materiales primitivos procedentes de toda la nebulosa solar. Estos materiales quedaron encerrados en hielos, que los han almacenado desde que existe el sistema solar. La misión ha descubierto cosas fabulosas, procedentes del interior del sistema solar, de los objetos extrasolares, quizás hasta de objetos del estilo de Plutón que se desintegraron, pero la muestra es limitada." La JAXA proyecta la toma de muestras de un núcleo cometario.

La Luna es otro lugar para la cosmoarqueología. Hace mucho que es la piedra Rosetta de la historia de los impactos en el sistema solar joven: conecta las edades relativas que se deducen del cómputo de cráteres con la datación absoluta de las muestras obtenidas por las

7. LA CUENCA AITKEN (*la mancha morada*) de la Luna, considerada la mayor oquedad del sistema solar, tiene un diámetro de 2500 kilómetros y unos 12 kilómetros de profundidad. Averiguar su edad es crucial para desentrañar las últimas etapas de la formación planetaria.



8. EL EXPLORADOR DE ASTEROIDES HAYABUSA es una sonda innovadora (y plagada de problemas) que podría servir de modelo para una misión de ida y vuelta a un núcleo cometario, excursión de la mayor importancia para los expertos en formación planetaria.



GRUPO DE CIENCIA CLEMENTINE, INSTITUTO LUNAR Y PLANETARIO (*arriba*); JAXA (*centro y abajo*)

misiones Apolo norteamericanas y las misiones soviéticas Luna. Sin embargo, las sondas que alunizaron en los años sesenta visitaron sólo un número limitado de suelos. No llegaron a la cuenca Aitken, un cráter del tamaño de un continente, en la cara oculta, cuya edad podría revelar el momento en que terminó la formación planetaria. La NASA está considerando el envío de un robot que traiga muestras de allí. Costaría unos 500 millones de dólares.

Una de las rarezas del sistema solar concierne a los asteroides del cinturón principal de asteroides, que parecen haberse formado antes que Marte. (Se constituyó éste antes que la Tierra.) Con ello se da la impresión de que una ola de formación planetaria se desplazó de fuera hacia dentro, posiblemente inducida por Júpiter.

Pero, ¿se ajusta Venus a esta progresión? No hay la menor información al respecto, asegura el experto en génesis planetaria Doug Lin, de la Universidad de California en Santa Cruz. Debido a sus nubes ácidas, presiones oceánicas y temperaturas ardientes, Venus no proporciona un entorno apto para el aterrizaje de una sonda. Uno de los comités del Consejo Nacional de Investigación recomendó en 2002 que se enviase un globo que tocara suelo justo el tiempo suficiente para recoger muestras, se elevara inmediatamente hasta alturas más templadas y procediera a su análisis o las remitiese a la Tierra. La Unión Soviética envió globos a Venus a mediados de los años ochenta. La agencia espacial rusa —que de otro modo hubiera desaparecido de la faz de la tierra en lo que a exploración planetaria se refiere— proyecta ahora una nueva sonda.

El estudio del origen de los planetas guarda una relación estrecha con el estudio del origen de la vida. Jakosky lo expresa de la siguiente manera: “Venus se halla en el borde interior de la zona de habitabilidad. Marte, en el borde exterior. La Tierra está en medio. Por tanto, comprender las diferencias entre estos planetas nos es crucial para poder inquirir acerca de la vida más allá del sistema solar”.

PLAN DE ACTUACION

- ✦ **Tomar muestras de un núcleo cometario, de la Luna y de Venus.**



5 Salir fuera del sistema solar

Hace dos años, las venerables sondas espaciales *Voyager* se vieron amenazadas de extinción. La NASA, con la caja vacía, admitió que quizá tuviera que dar por finalizado el programa. La consiguiente protesta pública hizo que no fuera así. Nada que haya sido tocado por manos humanas ha viajado tan lejos como el *Voyager 1*: ha recorrido ya 104 unidades astronómicas (UA) —esto es, 104 veces la distancia entre la Tierra y el Sol— y avanza 3,6 UA por año. En el año 2002 o 2004 (no hay acuerdo al respecto), entró en la misteriosa frontera multicapa del sistema solar, donde las partículas solares emergentes y el gas interestelar entrante se enfrentan cara a cara.

Pero la misión Voyager se concibió para estudiar los planetas exteriores, no el espacio interestelar. Sus baterías de plutonio se están agotando. Hace mucho que la NASA piensa en expedir una sonda del medio interestelar. Uno de los informes del Consejo Nacional

Tripulado o no

Los científicos muestran actitudes muy dispares frente a los vuelos tripulados. Unos piensan que son incompatibles con los objetivos científicos, si no les son perjudiciales. Otros creen que no sólo son compatibles, sino que la ciencia movida por la curiosidad y la exploración de algo sólo porque está ahí integran las dos caras de una misma inquietud exploradora. Otros piensan que los seres humanos querrán en un futuro abandonar el planeta, bien sea por puro deseo o por desesperación, aun cuando no haya llegado el momento adecuado.

Por muy variadas que sean las opiniones, hay coincidencia en ciertos puntos esenciales. Primero, aunque los astronautas pueden realizar ciencia útil en el espacio, en la Luna y en Marte, el coste de enviarlos al espacio supera de plano al beneficio científico. Tal desequilibrio podría cambiar en un futuro, cuando los robots no den más de sí. Mas, por ahora, los vuelos tripulados sólo pueden justificarse por razones distintas de las meramente científicas. El administrador de la NASA, Michael Griffin, ha declarado que la iniciativa de enviar astronautas a la Luna y a Marte no es de naturaleza científica, si bien la ciencia podrá sacarle provecho.

En segundo lugar, la Agencia Espacial tiene que respetar la barrera entre las misiones robóticas y las tripuladas, porque los objetivos de estas dos facetas del programa espacial son muy diferentes. En tercero, las iniciativas gubernamentales y privadas pueden hacer sus propias contribuciones. Cuando se deje de utilizar la lanzadera, y luego la Estación Espacial Internacional, las órbitas circunterrestres podrían cederse al sector privado. La NASA y otras agencias espaciales tendrían así más libertad para dedicarse a los proyectos más avanzados.

Por último, si las naciones del mundo envían astronautas al espacio, deberían proporcionarles algo interesante y estimulante que hacer allí. Para la mayoría de los científicos, la Estación Espacial en su estado actual no cuenta. Marte sí. Todavía se debate intensamente sobre la Luna.



GETTY IMAGES

ECHANDO CUENTAS

El presupuesto de la NASA es **16.800 millones de dólares**, un **0,6 por ciento** del presupuesto federal de Estados Unidos. Tres quintas partes se emplean en los vuelos tripulados, una tercera parte es para la ciencia (tanto sondas planetarias como telescopios espaciales que exploran el universo visible) y el resto se destina a la aeronáutica.

La agencia estima que el nuevo objetivo lunar necesitará unos **100.000 millones de dólares** en el transcurso de los próximos diez años. El programa Apolo vino a costar lo mismo.

Ese dinero se sacará del retiro paulatino de la lanzadera y la estación espacial. El presidente George W. Bush se ha retractado de su promesa inicial de conceder algunos miles de millones de dólares adicionales. El programa científico se reducirá en un **20 por ciento**. Se han anulado o aplazado numerosas misiones.

El administrador de la NASA, Michael Griffin, prevé que, si el presupuesto de la agencia sigue creciendo con la inflación, aterrizarán astronautas en Marte a **finales del decenio de 2030**.

de Investigación de 2004 recomienda que la agencia se ponga manos a la obra.

Esa nave mediría la abundancia de aminoácidos en las partículas interestelares para determinar cuántos de los compuestos orgánicos complejos del sistema solar proceden de fuera; buscaría las partículas de antimateria que se podrían haber originado en los miniagujeros negros o en la materia oscura; investigaría en qué medida la frontera del sistema solar impide la entrada de materia, por ejemplo de rayos cósmicos que quizás afecten al clima en la Tierra; y establecería si el espacio intergaláctico próximo tiene un campo magnético, que desempeñaría una función importante en la formación de estrellas.

La sonda en cuestión podría servir de telescopio espacial en miniatura. Realizaría observaciones cosmológicas sin el entorpecimiento del polvo del sistema solar. Investigaría la anomalía Pioneer —una fuerza desconocida que actuó sobre otras dos naves lejanas, Pioneer 10 y 11— y precisaría dónde enfoca la gravedad del Sol los rayos de luz, como prueba de la teoría de la relatividad general de Einstein. Cabría dirigir la sonda hacia una estrella cercana, a Epsilon Eridani, por ejemplo, aunque para llegar allí harían falta decenas de miles de años.

Llevar una nave a cientos de unidades astronómicas en un plazo no mayor que la carrera de un investigador (y sin agotar la carga de plutonio) obligaría a viajar a 15 UA por año. Tres opciones: grande, mediana y pequeña, o propulsión iónica alimentada por un reactor nuclear, propulsión iónica alimentada por generadores de plutonio o vela solar.

En 2005, el equipo de Thomas Zurbuchen, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, perfiló mejor las misiones grandes (36.000 kilogramos). Lo propio hizo con las medianas (1000 kilogramos) el grupo de Ralph McNutt, del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins. Pero es la opción pequeña la que más probabilidad tiene de volar. El programa Visión Cósmica de la ESA está sopesando una propuesta de un grupo internacional de científicos, encabezado por Robert Wimmer-Schweingruber, de la Universidad de Kiel, en Alemania. Es posible que la NASA se agregue a este proyecto.

Una vela solar de 200 metros impulsaría a una nave espacial de 500 kilogramos. Tras su lanzamiento desde tierra, la nave se acercaría al Sol tanto como fuera posible, hasta internarse en la órbita de Mercurio; entonces, la intensa luz solar la impelería. A la manera de un surfista sobre el oleaje, la nave se inclinaría a uno u otro lado para cambiar de dirección. Justo antes de atravesar la órbita de Júpiter, se desharía de la vela y "planearía" hacia el exterior. Hay que diseñar una vela suficientemente ligera y probarla en una misión menos ambiciosa.

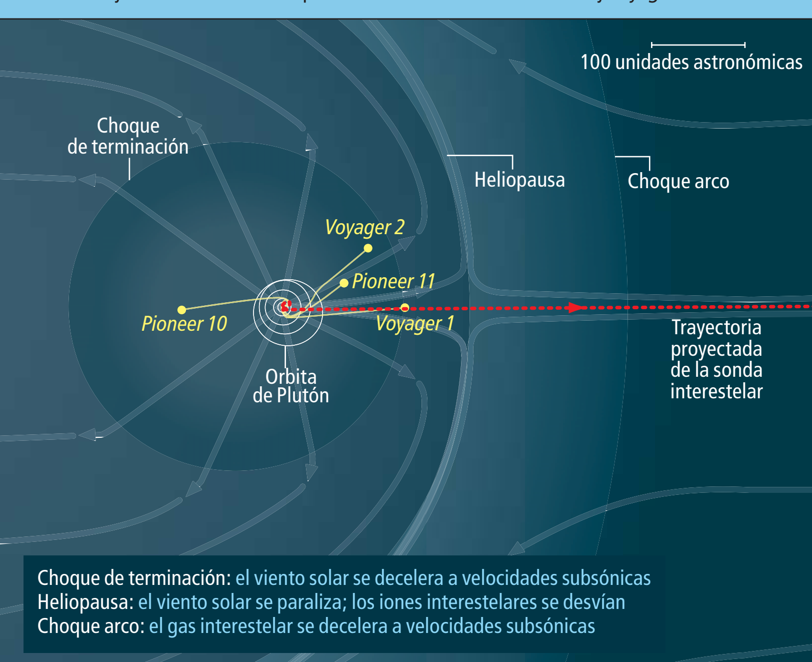
Se prevé un coste de unos dos mil millones de dólares, incluidos los gastos de operación a lo largo de treinta años. Gracias al estudio de otros planetas sabemos mejor cuál es el lugar de la Tierra en un contexto más amplio. El estudio del entorno interestelar haría lo mismo con el sistema solar.

PLAN DE ACTUACION

✦ **Emprender el desarrollo y puesta en práctica de las técnicas necesarias para una sonda interestelar.**

LOS LIMITES EXTERIORES

▼ Una sonda interestelar exploraría la frontera del sistema solar, donde el gas procedente del Sol empuja al gas interestelar ambiental. Esta sonda debería contar con una velocidad, una resistencia y unos instrumentos superiores a los de las sondas *Pioneer* y *Voyager*.



LUCY READING-IKKANDA (*arriba*); ESA (*abajo*)

9. UNA VELA SOLAR es un gran espejo (por lo común de Mylar) que apresa el momento de la luz solar. Una sonda interestelar necesita una vela con una densidad de un gramo por metro cuadrado, por 20 gramos por metro cuadrado de las velas de hoy día; no obstante, los ingenieros creen que tal reducción es factible.



Bibliografía complementaria

Las posiciones actuales de los *Voyagers* y los *Pioneers* pueden verse en **http://heavens-above.com/solar-escape.asp**

El informe de la NASA sobre la amenaza de los asteroides está disponible en **http://neo.jpl.nasa.gov/neo/report2007.html**. Una crítica al respecto se encuentra en **www.b612foundation.org/press/press.html**

El administrador de la NASA, Michael Griffin, trata del futuro de la Agencia en **aviationweek.typepad.com/space/2007/03/human_space_exp.html**

Los informes del Consejo Nacional de Investigación están disponibles en **www.nap.edu/catalog/11938.html** (vida en Marte), **11820.html** (ciencias de la Tierra), **11644.html** (presupuesto científico), **11135.html** (física solar) y **10432.html** (sistema solar).

Un alto en el camino

Josep-Maria Gili y Giuseppe-Maria Carpaneto

Las libélulas son muy comunes en zonas costeras. Las del género *Sympetrum* habitan sobre todo en lagunas costeras y en aguas dulces estancadas con una vegetación espesa.

Durante el otoño migran hacia el norte de Africa; para ello atraviesan el Mediterráneo, aprovechando las mismas corrientes de aire que utilizan las aves en sus largos recorridos. Se desplazan miles de kilómetros en pocas semanas; se detienen sólo cuando están muy cansadas o los fenómenos meteorológicos les impiden volar. En los días de niebla, la humedad del aire impregna sus frágiles alas, que aumentan de peso. Así sobrecargadas, deben posarse en el suelo y descansar hasta que mejoren las condiciones.

En mar abierto, las embarcaciones dan abrigo a los enjambres de miles de libélulas migratorias. Se asientan en las antenas y los cables del barco, ya que guardan semejanza con las ramas de la vegetación donde se alojan normalmente. Episodios aislados como el que muestran las fotografías revisten importancia para el insecto en migración debido a la escasez de sustrato disponible en mar abierto.



1. *Sympetrum fonscolombii*, especie muy común en el norte de Africa y la Europa meridional.



2. Buque oceanográfico García del Cid (ICM-CSIC). En la proa se concentran las antenas y cables donde se asientan las libélulas para reposar.







4. Las libélulas recuperan la actividad al amanecer, una vez secas las alas de la humedad nocturna.



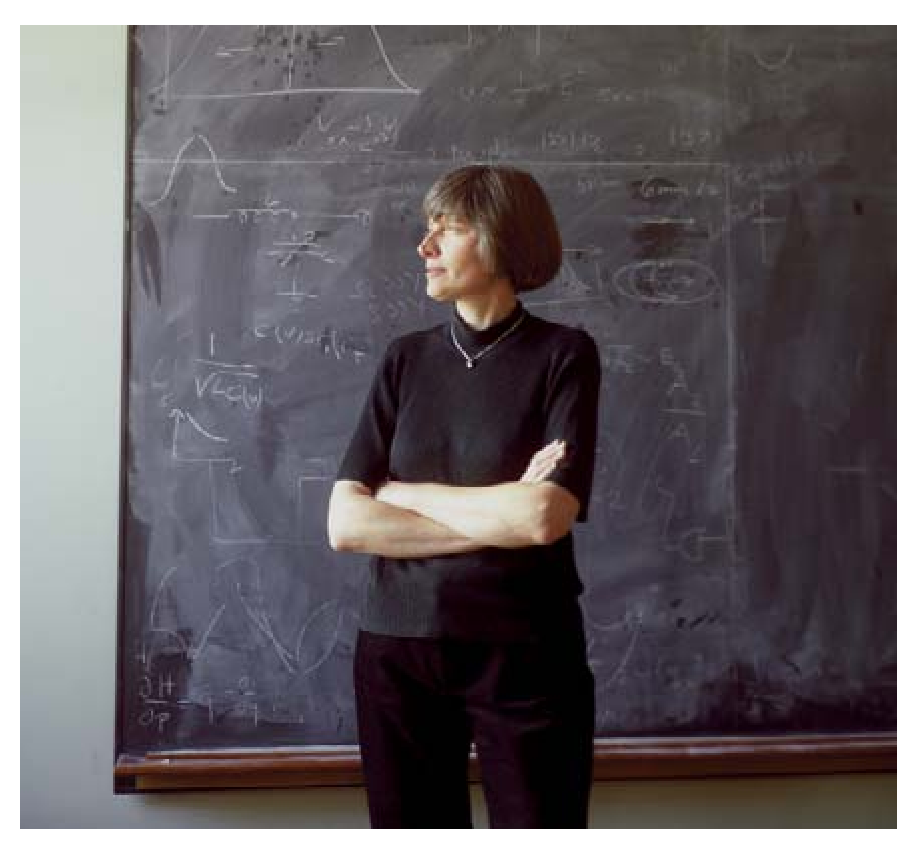
3. Las libélulas se agrupan en las antenas y los cables del barco, de la misma manera que se asientan sobre las ramas de los cañizares costeros.

Lene Vestergaard Hau: Visiones en la oscuridad de la luz

Saltó a la fama por frenar la luz hasta el punto de que se moviera más despacio que un coche. Ahora puede detenerla, extinguirla y devolverla a la existencia. La información cuántica adquiere así nuevas formas

Marguerite Holloway

La época del año que más le gusta a Lene Vestergaard Hau es por San Juan, cuando el cielo de su Dinamarca natal se tiñe de azul claro y metálico y el Sol se esconde tan sólo durante unas horas. "No oscurece del todo", me cuenta en su luminoso despacho de la Universidad de Harvard. "Las noches son largas y claras. Es una estación maravillosa. Es lo que de verdad echo de menos aquí." Hau marchó a los Estados Unidos para una estancia posdoctoral hace veinte años, saltó a un nuevo campo de la física, puso en marcha otro y se ha quedado allí desde entonces. En ese tiempo, nos ha hecho ver de otra manera los atributos de la luz.



"WHAT VISIONS FROM THE DARK OF LIGHT", DE SAMUEL BECKETT'S *COMPANY*, 1979; FOTOGRAFIA DE KATHLEEN DOOHER

La velocidad de la luz en el vacío, 299.792.458 metros por segundo, "es tan alta, que escapa a la comprensión", dice Hau. "Poderla domesticar, traerla a niveles más humanos, resulta apasionante." Y eso es exactamente lo que ha logrado esta física: que la luz marche despacio y quede encerrada en una jaula diminuta, que permanezca allí mansamente e incluso que desaparezca, para volver a brotar a una cierta distancia. No tiene nada de extraordinario que la luz se frene: los fotones que atraviesan el agua sólo avanzan a unos 224.844.344 metros por segundo. Y cuando incide en una superficie opaca, se detiene y aniquila. Pero antes de los experimentos de Hau, la luz nunca había viajado a 17 metros por segundo, ni nunca se había extinguido para revivir más tarde.

Como los fotones se trasladan con rapidez a largas distancias sin degradarse, en ellos se centran quienes tratan de crear ordenadores cuánticos o de mejorar las comunicaciones ópticas. Las proezas de Hau no se pueden aplicar directamente. Tienen lugar en condensados de Bose-Einstein (un agregado de átomos muy fríos que actúan como una sola entidad). Pero sus trabajos abordan los fundamentos mismos del almacenamiento y procesamiento de la información mediante la luz. Deteniendo la luz, "se almacena un bit cuántico. Conceptualmente hablando, es una nueva clase de unidad de memoria", dice Seth Lloyd, especialista en física cuántica del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Hau no se había propuesto dedicarse a la física experimental. Su formación era teórica, aunque en los años ochenta, primero en su Dinamarca natal y luego en el CERN (cerca de Ginebra), ya había estudiado la materia condensada. Supo entonces que se estaban enfriando átomos hasta temperaturas bajísimas por medio de láseres. En 1988 viajó a Estados Unidos para conocer a otros inves-

LENE VESTERGAARD HAU

COMO IR MAS DEPRISA QUE LA LUZ: Utiliza láseres y condensados de Bose-Einstein (átomos enfriados hasta casi el cero absoluto) para aminorar la velocidad de la luz a 17 metros por segundo (como una bicicleta de carreras, más o menos), o incluso detenerla del todo.

AL CALOR DEL FRIO: Empezó a estudiar los condensados poco después de que se produjeran por primera vez en 1995, pero tomó un camino diferente del elegido por otros investigadores: "En el fondo, sabía que me estaba adentrando en un territorio inexplorado; allí donde se abren nuevas posibilidades".



Los dispositivos ópticos de Hau frenaron la luz hasta 17 metros por segundo, la extinguieron y la devolvieron a la existencia

tigadores, dar conferencias y satisfacer su deseo de "comprobar si esa nación es como en las películas". Le pareció que sí: un país enorme, de coches grandes y gente locuaz y abierta.

Una de sus visitas la llevó al Instituto Rowland de Cambridge (Massachusetts), una pequeña organización sin ánimo de lucro que hace cinco años se unió a la Universidad de Harvard. Allí conoció a los físicos Michael Burns y Jene A. Golovchenko; ambos la animaron a estudiar la materia fría, aunque ninguno de ellos trabajaba en ese campo tan reciente. "Podría haber ido a otro lugar más conspicuo, pero habría sido una decisión demasiado trillada."

Hau buscó el modo de obtener un suministro constante de átomos de sodio en el vacío. Enfrió los átomos de sodio hasta cerca del cero absoluto. A comienzos del verano de 1997 creó algunos condensados de Bose-Einstein "grandes, realmente grandes". Se había ya predicho tal estado de la materia, pero hasta unos años antes no se había conseguido generarlo (logro que valió a sus creadores un premio Nobel, el de 1995). Hau pensaba en un principio utilizar la luz para indagar cuáles eran las propiedades de esta nueva forma de la materia. Sin embargo, finalmente se valió del condensado para manipular la luz. En 1999, en un experimento que se ha hecho famoso, disparó un rayo láser sobre el condensado, para que los fotones se movieran por su interior. "Fue un experimento muy, muy complicado, porque estaba justo en el límite de lo posible" [*véase* "Luz inmovilizada", por Lene V. Hau; Investigación y Ciencia; septiembre de 2001].

El condensado está formado por átomos de sodio fijados por un campo magnético e iluminados por un láser "acoplador" que vuelve el condensado transparente a una frecuencia específica. Cuando un breve pulso proveniente de otro láser, un láser "sondeador", con fotones de esa frecuencia, incide sobre el condensado, aparece un estado cuántico oscuro. Lo que significa que los átomos de sodio entran en superposición, es decir, se encuentran simultáneamente en dos estados de energía. Al topar con esos átomos, los fotones quedan entrelazados con ellos. El borde delantero del pulso luminoso se frena, y el borde trasero se le acerca, de modo que la luz se comprime en el condensado, de cien micrometros de espesor, como un fuelle.

En otros experimentos ya se había decelerado la luz en un factor 165 (hasta unos 1.816.923 metros por segundo) con la misma técnica de transparencia que usa Hau. Pero conseguir que la luz viajase a 17 metros por segundo dio alas al empeño mundial en ese tipo de investigaciones, según Stephen E. Harris, de la Universidad de Stanford, que colaboró con Hau y fue el primero en realizar la transparencia inducida electromagnéticamente y frenar con ella la luz, a principios de los noventa. Desde entonces, otros investigadores han ralentizado la luz en gases calientes, así como en cristales y en semiconductores a temperatura ambiente.

Tras frenar la luz, Hau y su equipo se propusieron detenerla y volver a ponerla en marcha. En 2001 descubrieron que apagando el láser acoplador el pulso de luz desaparecía en el condensado; sin embargo, su forma característica, su amplitud y su fase quedaban impresas en los átomos de sodio. Cuando se volvía a encender el láser acoplador, el aporte de energía provocaba que los átomos de sodio saltaran de nivel de energía, liberando en el proceso un pulso de luz con la misma fase y amplitud que el láser sondeador original. La luz había traído cierta información, se la había transmitido a la materia y había desaparecido. Luego, la materia había producido luz que contenía esa misma información. De esa forma se guarda información en el sistema; por lo tanto, como explica Hau, no ocurre al azar, sin control alguno.

Este año, Hau y dos miembros de su laboratorio, Naomi S. Ginsberg y Sean R. Garner, fueron un paso más allá al transmitir las características del pulso de luz entre dos condensados. Enviaron un pulso del láser sondeador al primer condensado, donde, como esperaban, se frenó. A continuación apagaron el láser acoplador. El pulso luminoso del láser sondeador desapareció, no sin antes comunicar la información sobre su amplitud y su fase a los átomos de sodio. Estos átomos adquirieron también momento a resultas de las colisiones con los fotones, momento que los despidió del primer condensado e impulsó a través del corto espacio que los separaba de un segundo condensado. Una vez llegaron allí esos átomos —la copia en materia de la información contenida en el pulso de luz extinguido—, se encendió el láser acoplador. Los átomos, ávidos por unirse al segundo condensado, cambiaron de nivel de energía y liberaron fotones con la misma fase y amplitud que los que habían entrado en el primer condensado.

Como indican Hau y Lloyd, transferir luz a la materia y viceversa significa que puede procesarse la información cuántica. "En resumidas cuentas, la luz sondeadora podría transportar información cuántica a larga distancia a través de fibra óptica", explica Hau. "Luego, si se quisiese hacer algo con ella, se transferiría a la materia. Podemos servirnos de la dinámica de la materia para cambiar la información óptica." Las interacciones de la luz en los condensados de Bose-Einstein han revelado, además, fenómenos inesperados: por ejemplo, una especie de "tornados" en los condensados que unas veces, como bolas de billar, rebotan unos en otros, y que otras veces se aniquilan mutuamente. "Es una extraña fenomenología. Los experimentos nos muestran muchas más cosas que los cálculos."

Los muchos experimentos de Hau le han apartado de los días celestes de San Juan. Pero se ha traído Escandinavia a los nuevos locales de su laboratorio: las paredes están pintadas de amarillo y naranja, los muebles son de madera clara. "Los colores son muy importantes", dice. "Los colores y la luz, en los que percibes la felicidad."



Los batolitos de Sonora

La composición química e isotópica de los batolitos graníticos de Sonora arroja luz sobre la naturaleza y la configuración del basamento del suroeste de Norteamérica

Martín Valencia Moreno

Desde el noroeste de Canadá hasta el sur de México, una cadena de afloramientos graníticos imponentes flanquea el borde occidental de Norteamérica. Estas masas de rocas plutónicas se originaron en áreas profundas de la corteza terrestre, como producto de la subducción sostenida del lecho oceánico debajo del continente norteamericano durante el Mesozoico y el Cenozoico. De ahí su nombre de batolitos (del griego *batos*, profundidad, y *litos*, piedra).

Los batolitos se desarrollaron a partir de la fusión de una sección del manto astenosférico, que quedó atrapado, en forma de cuña, entre la placa subducida y la placa continental.

Formación de los batolitos

De acuerdo con el modelo más aceptado para este tipo de régimen tectónico, la fusión del manto se debe a la deshidratación de ciertos minerales de la placa oceánica alterada, en particular del grupo de los anfíboles, a unos 100 kilómetros de profundidad. Este proceso aporta fluidos que ascienden y se imbrican en el manto, con la rebaja consiguiente del punto de fusión del mismo. El manto presenta en origen una composición peridotítica anhidra. (La peridotita es una roca ígnea de dureza notable y densidad elevada.) Al hidratarse las zonas de la cuña del manto, por la aportación de fluidos, se genera una fusión parcial espontánea donde la temperatura resulta excesiva para la nueva composición.

El líquido producido, más ligero que el manto inicial, asciende en forma de magma basáltico hasta la base de la corteza continental. En esa región, el magma interactúa con la corteza inferior: funde parte de la misma y origina materiales de densidad menor, en general de composición basáltico-andesítica. Puesto que los productos son cada vez más ligeros, debido a la separación progresiva de los minerales que cristalizan con mayor prontitud, el magma granítico resultante presenta una flotabilidad elevada. Y en virtud de esa fuerza de Arquímedes, el magma se desplaza hacia regiones más someras de la corteza. Hasta terminar alojado a una profundidad de entre 5 y 15 kilómetros.

Las burbujas de magma granítico se enfrían con lentitud. Durante el enfriamiento, el magma segrega fases subvolcánicas que pueden inyectarse a menos de un kilómetro de profundidad. Este fenómeno reviste particular interés en Sonora, sita en el noroeste de México, y, en general, en el suroeste de Norteamérica, ya que algunas de estas intrusiones graníticas menores, caracterizadas por una textura porfirítica, promovieron la formación de grandes depósitos de cobre y molibdeno. Se aprecia en Cananea y La Caridad, en el norte de Sonora.

Batolitos sonorenses

Los batolitos graníticos de Sonora se asocian a la subducción, por debajo de Norteamérica, de la extinta placa oceánica Farallón. Forman

CONCEPTOS BASICOS

- En Sonora afloran cadenas de batolitos graníticos de entre 120 y 40 millones de años de antigüedad.
- Estas masas de rocas plutónicas se originaron en áreas profundas, como producto de la subducción del lecho oceánico debajo del continente norteamericano.
- Constituyen ahora una suerte de "mensajeros" del interior de la corteza terrestre. Su composición química e isotópica revela la configuración del basamento.



cinturones que se extienden desde la península de Baja California hacia el este por Sonora y hasta el centro del estado de Chihuahua. Tan notable amplitud del área afectada por el magmatismo del noroeste de México se ha atribuido a una progresiva reducción en el ángulo de subducción de la placa Farallón. En virtud de esa reducción, el foco de la actividad ígnea se alejó de la zona de trinchera.

La edad de los batolitos graníticos oscila entre 120 y 40 millones de años, aunque en el noroeste de Sonora se han hallado plutones con edades mesozoicas más antiguas. Los datos geocronológicos sugieren una clara migración del arco volcánico en ese intervalo temporal. La estimación de la velocidad de migración entraña, no obstante, cierta complejidad, debido a que no existe un control sistemático de las edades. Asimismo, el hecho de que la península de Baja California girara en su parte sur y fuera transportada unos 350 kilómetros hacia el noroeste durante el Mioceno, complica también el escenario para la reconstrucción de la posición original del arco. Con todo, se estima que el arco magmático alcanzó la actual costa sonorense hace unos 90 millones de años (Ma).

El arco inició entonces un período de migración más acelerada, que coincidió con el tectonismo asociado a la orogenia Laramide. El magmatismo se extendió hasta la región central de Chihuahua, a unos 1000 kilómetros al este de la paleotrinchera situada al oeste de Baja California; se extinguió hace unos 40 Ma. Tras un período de unos seis millones de años, la actividad ígnea resurgió de forma violenta en el este, allí donde había cesado la actividad ígnea laramídica. Este nuevo pulso magmático se caracterizó por una gran explosión volcánica que dio origen a la Sierra Madre Occidental, una de las provincias ignimbríticas más espectaculares del planeta. Semejante alfombra volcánica, en su mayor parte silícea, cubre buena parte de la porción oriental del cinturón de batolitos laramídicos; en la parte occidental, en cambio, la erosión ha descubierto las rocas graníticas.

Otro rasgo de interés en la configuración actual del cinturón de batolitos de Sonora concierne a las huellas de la extensión corti-

1. BATOLITO GRANITICO expuesto en la región centro-oriental de Sonora. El acercamiento muestra la composición de la roca: cristales de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico en las partes claras; cristales de hornblenda y biotita en las zonas oscuras. Arriba a la derecha, la sierra. Aunque lejos, se distinguen las clásicas formas redondeadas de las rocas graníticas, producidas por “exfoliación” o intemperismo mecánico y químico.

MARTIN VALENCIA MORENO

cal ocurrida en el Terciario. Dicha extensión afectó a todo el suroeste de Norteamérica; se debió a cambios en la cinemática de las placas, incluidos la posible rotura y despegue del segmento más oriental de la placa subducida. En Sonora, la extensión fue mayor en la parte norte, donde alcanzó tasas superiores al 100 por ciento.

En las etapas iniciales de la extensión se produjo un adelgazamiento extremo de la corteza, con el afloramiento consiguiente de las rocas del basamento, caracterizadas por una prominente deformación dúctil que dio lugar a complejos con núcleo metamórfico. Estos complejos suelen exhibir, además, la presencia de plutones peraluminosos, generados por fusión de la corteza; generan batolitos genuinos, que afloran en la parte central y centro-norte de Sonora.

Pero la principal manifestación de la extensión terciaria en Sonora se halla en los grandes bloques levantados y hundidos que dieron lugar al sistema de sierras y valles paralelos. Tales bloques limitan fallas profundas, que sirvieron de conducto para el ascenso de flujos, basálticos en una primera instancia y, luego,

FORMACION DE LOS BATOLITOS

Desde el noroeste de Canadá hasta el sur de México, una cadena de afloramientos graníticos imponentes flanquea el borde occidental de Norteamérica. Estas masas de rocas plutónicas se originaron en áreas profundas de la corteza terrestre, como producto de la subducción sostenida del lecho oceánico debajo del continente norteamericano durante el Mesozoico y el Cenozoico. El esquema ilustra el proceso de formación de los batolitos sonorenses.

1 A unos 100 kilómetros de profundidad, ciertos minerales de la placa oceánica alterada se deshidratan.

2 Los fluidos resultantes ascienden y se imbrican en una cuña de manto astenosférico atrapado entre la placa subducida y la placa continental. Ello rebaja el punto de fusión del manto, lo que genera una fusión parcial espontánea allí donde la temperatura resulta excesiva para la nueva composición.

3 El líquido producido, más ligero que el manto inicial, asciende en forma de magma basáltico hasta la base de la corteza continental.

4 El magma interactúa con la corteza inferior. Funde parte de la misma y origina materiales de densidad menor, en general de composición basáltico-andesítica.

5 Debido a la separación progresiva de los minerales que cristalizan con mayor prontitud, los productos son cada vez más ligeros. El magma granítico resultante presenta una flotabilidad elevada, en virtud de la cual se desplaza hacia regiones más someras de la corteza, hasta terminar alojado a una profundidad de entre 5 y 15 kilómetros.

MARTIN VALENCIA MORENO

de tipo bimodal. Las fallas aparecen intercaladas con sedimentos clásticos continentales del Mioceno, que rellenan los bloques hundidos. A su vez, los bloques levantados muestran los grandes batolitos graníticos de Sonora, que forman franjas alargadas en dirección noroeste-sureste, separadas entre sí por los bloques hundidos.

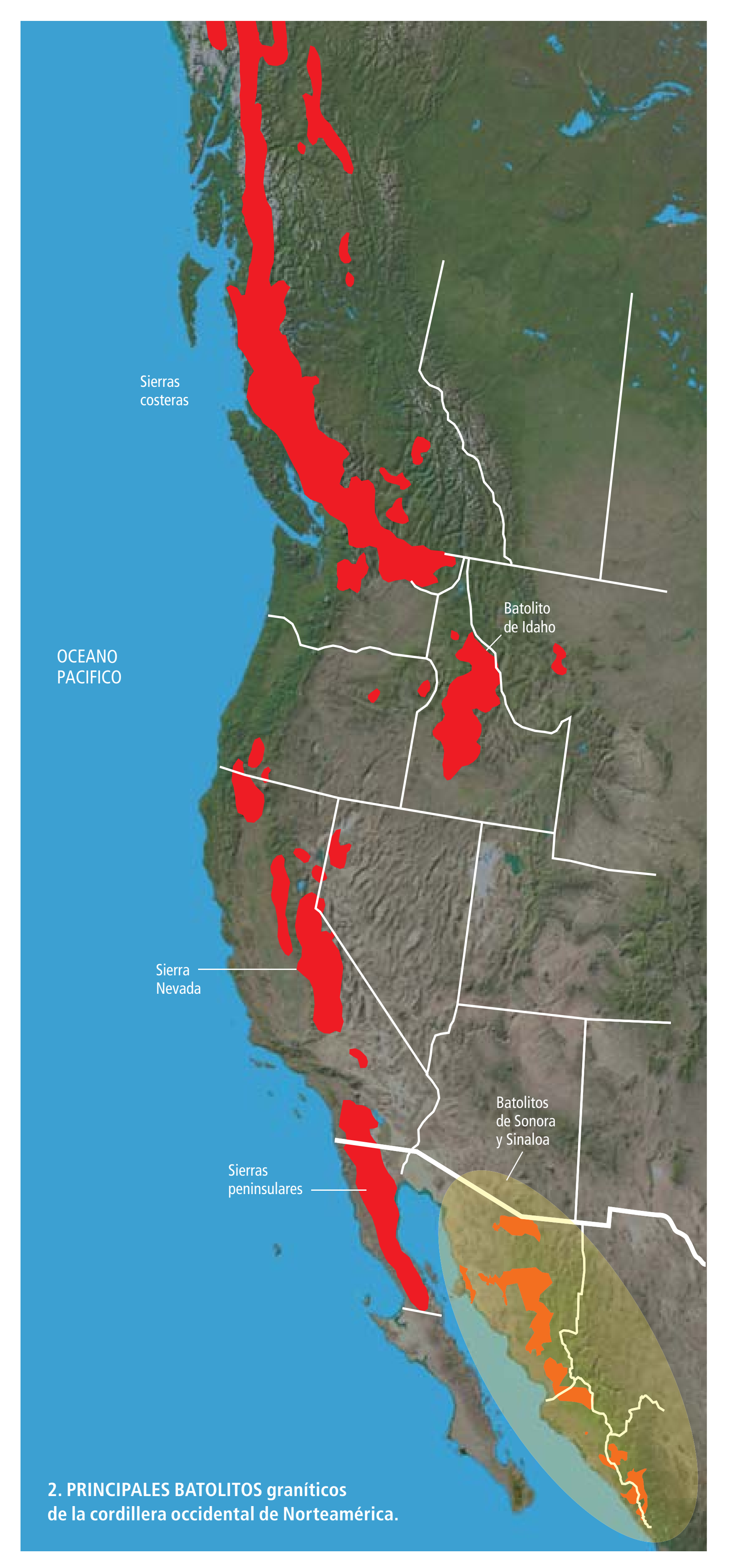
Distribución de las rocas

En ausencia de afloramientos diagnósticos, la determinación de los límites de los elementos del basamento de Sonora se lleva a cabo mediante el estudio geoquímico e isotópico de las rocas graníticas. La geología de Sonora se caracteriza por la presencia de un basamento cristalino proterozoico, compuesto por rocas plutónicas, gneises y esquistos metamorfizados en facies de anfibolita, expuestas en la parte noroeste del estado, sobre todo al sur de Caborca. En la parte norte y noreste aflora, en menor proporción, una secuencia deformada de rocas volcánicas y sedimentarias en facies de esquistos verdes.

A tenor de las primeras investigaciones, podrían diferir en edad las rocas proterozoicas de una y otra región. La primera tendría 1700-1800 millones de años; la segunda, se estima en 1600-1700 millones de años. Aunque pequeña, esa diferencia de edad encendió la polémica sobre la geología de México y de Norteamérica.

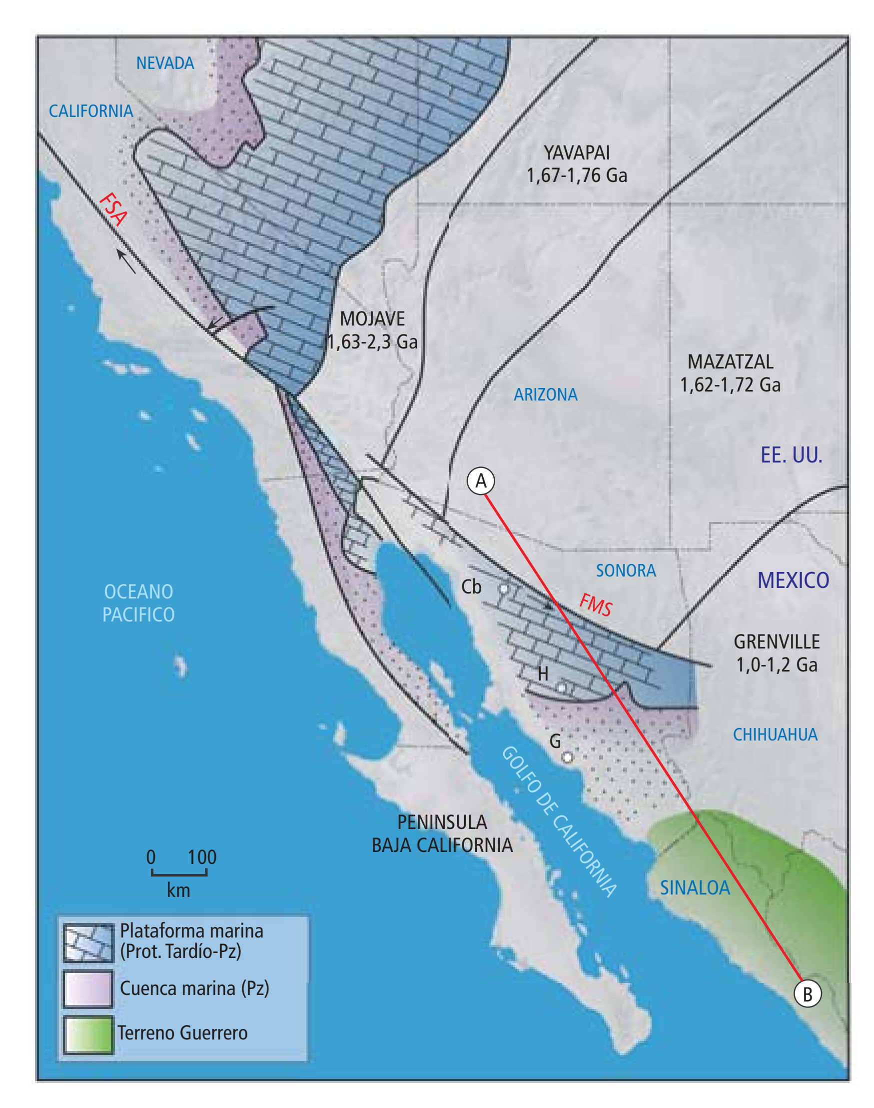
En efecto, proponía la tesis debatida que una gran falla jurásica con desplazamiento lateral izquierdo rompió parte del basamento del suroeste de Norteamérica y lo transportó unos 800 kilómetros al sureste, a través de lo que hoy ocupa el desierto de Mojave, en el sur de California y el noroeste de Sonora.

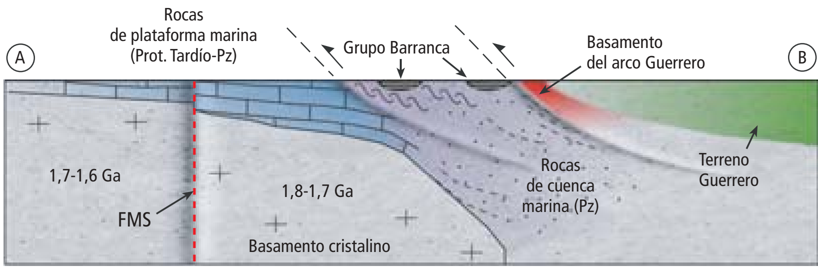
Un poco más al sur, cerca de la latitud de Hermosillo, las rocas cristalinas proterozoicas escasean, si bien se hallan también en el centro del estado de Sonora. Sobre esas rocas se superpuso una gruesa secuencia de rocas sedimentarias de plataforma marina, con edades del fin del Proterozoico y Paleozoico, que abundan en la región central de Sonora. En esta región se observa cómo esta plataforma fue montada por una secuencia sedimentaria paleozoica de una cuenca marina profunda, la cual fue transportada de forma compresiva hacia el norte-noroeste durante la transición entre el Paleozoico y el Mesozoico. A pesar de su abundancia, los afloramientos de rocas paleozoicas terminan de manera brusca al entrar en la mitad sur del estado. Ello se debe a la presencia de grandes cuencas de tipo abanico, alargadas en dirección este-oeste, que fueron colmatadas por los primeros sedimentos clástico-continentales de Sonora durante el



2. PRINCIPALES BATOLITOS graníticos de la cordillera occidental de Norteamérica.

MARTIN VALENCIA MORENO





3. CONFIGURACION DEL BASAMENTO del suroeste de Norteamérica. Allí se alojaron los batolitos graníticos laramídicos. Se muestran las principales provincias proterozoicas del suroeste de los Estados Unidos. Parte del basamento aparece dislocado por importantes fallas laterales como la Mojave-Sonora (*FMS*) y la falla de San Andrés (*FSA*). Cb: Caborca; H: Hermosillo; G: Guaymas. *A* y *B* corresponden a los límites de la sección transversal que muestra los principales límites tectónicos hallados en Sonora (*abajo*).

Triásico Tardío. Esos sedimentos definen el Grupo Barranca.

Sin embargo, en el sur de Sonora se vuelven a observar algunos afloramientos de rocas sedimentarias de cuenca marina profunda de edad paleozoica. Más al sur, y subyacente en la mayor parte del occidente de México, el basamento está dominado por rocas del Jurásico Tardío al Cretácico Medio, asociadas al Terreno Guerrero. Estas incluyen una secuencia volcánica con afinidad de arco de islas oceánicas intercaladas con rocas sedimentarias asociadas, que se agregaron a Norteamérica en el Cretácico Tardío. Aunque se han hallado rocas del Terreno Guerrero hasta la parte norte de Sinaloa, no se ha definido todavía el límite de las mismas.

Granitos: mensajeros del interior de la corteza

Desde los años setenta del siglo pasado, las rocas graníticas se convirtieron en poderosa herramienta en el estudio de basamentos no expuestos o poco conocidos. Se descubrió que la composición de estas rocas podía revelar importantes secretos sobre la naturaleza del magma inicial y la petrogénesis del mismo. Por esta razón, y merced al refinamiento de las técnicas de análisis de las masas elementales e isotópicas, los granitos constituyen ahora una suerte de "mensajeros" de los procesos que ocurren en el interior de la tierra, así como de la composición del basamento, sobre todo en regiones inaccesibles de la corteza. En ese contexto, los granitos se aplican a la determinación de límites tectónicos.

En el caso de Sonora, el cinturón de granitos laramídicos se extiende en dirección noroeste-sureste a través de bloques de basamento, en sentido transversal a la posición esperada de los límites tectónicos. Ello ofrece una oportunidad excelente para la ubicación (indirecta) de los límites del basamento sonorense, de acuerdo con la tesis de que los granitos pudieron haber adquirido información acerca de la composición de las rocas donde quedaron emplazados. Bajo esta consideración, se llevó a cabo un estudio sistemático basado en el análisis de la geoquímica elemental y de las relaciones isotópicas entre rubidio-estroncio (Rb-Sr) y samario-neodimio (Sm-Nd).

Composición mineralógica y geoquímica

Los batolitos graníticos de Sonora corresponden a una mezcla de inyecciones múltiples. Su composición varía entre cuarzodiorita y granito, si bien las granodioritas de biotita y hornablenda constituyen el componente mayoritario. La mineralogía está dominada por cantidades variables de cuarzo, plagioclasa, feldespato alcalino, biotita, hornablenda y fracciones menores de piroxeno, esfena, apatito, epidota y circón. Aunque no existe un control geográfico de la distribución de las composiciones litológicas, se observan variedades más

MARTIN VALENCIA MORENO

gabroicas y tonalíticas hacia la península de Baja California y la costa de Sonora, y más granodioritas y granitos (*sensu stricto*) hacia el oriente del cinturón plutónico.

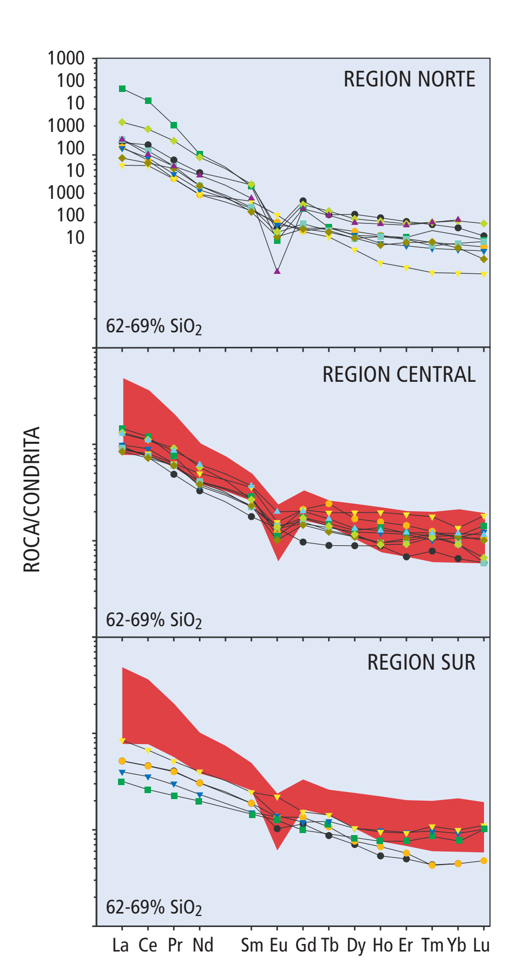
La concentración de los elementos químicos de mayor abundancia (por encima del 1 por ciento del volumen) se ha determinado mediante fluorescencia de rayos X. El potasio presenta valores medios y elevados respecto de la concentración de sílice; ello indica una composición calco-alcalina. Por otro lado, los índices de alcalinidad, en general inferiores a 1,0, sugieren una firma metaluminosa, lo que apoya la idea de un origen asociado a subducción. Con todo, los elementos mayoritarios aportan escasa información sobre las variaciones en el basamento.

Más reveladores son los elementos traza (inferiores al 0,1 por ciento del volumen). El análisis mediante espectrometría de masas con inducción acoplada de plasma de argón (ICP-MS) descubrió un interesante comportamiento en las concentraciones de "tierras raras" (o lantánidos, los elementos químicos cuyo número atómico está comprendido entre el 57 y el 71). Debido a su gran afinidad química, esos elementos difícilmente se fraccionan o separan durante los procesos magmáticos. Por esta razón, no suelen hallarse diferencias en la concentración de lantánidos en rocas graníticas asociadas a un mismo proceso tectono-magmático.

Sin embargo, debido a las modificaciones inducidas por las diferencias en las intrusiones de basamento, las rocas graníticas analizadas muestran variaciones geográficas, sobre todo de norte a sur. Hacia el norte, donde las intrusiones graníticas quedaron emplazadas en un basamento antiguo de afinidad norteamericana, abundan más las tierras raras; los patrones normalizados en torno a un valor condrítico muestran pendientes pronunciadas hacia los elementos más ligeros (del lantano al samario), amén de anomalías negativas de europio. En la parte sur del cinturón, dominada por las rocas del Terreno Guerrero, las tierras raras son menos enriquecidas; los patrones normalizados presentan una pendiente inferior y anomalías negativas de europio poco definidas. La región central presenta una situación intermedia; ello refleja una disminución progresiva en la influencia del basamento proterozoico de Norteamérica hacia el sur.

Isótopos radiogénicos

Los granitos laramídicos de Sonora se analizaron, mediante espectrometría de masas de ionización térmica (TIMS), para determinar la composición de los isótopos de Rb-Sr y Sm-Nd. Se obtuvieron relaciones isotópicas iniciales de $^{87}Sr/^{86}Sr$ entre 0,7070 y 0,7089 en la parte norte del cinturón; en la región central entre 0,7064 y 0,7073 y entre 0,7026 y 0,7062 en la porción sur del cinturón. Las relaciones iniciales de $^{143}Nd/^{144}Nd$, expresadas en forma de valores de épsilon neodimio (εNd), presentan rangos entre –5,4 y –4,2 en la porción norte; entre –5,1 y –3,4 en la parte central; y entre –0,9 y +4,2 en el sur del cinturón granítico.



4. DIAGRAMAS DE TIERRAS RARAS normalizadas en torno a la condrita para los batolitos laramídicos de Sonora, de acuerdo con el tipo de corteza en el que quedaron emplazados. En los diagramas de las regiones centro y sur del cinturón se representa también la composición de los granitos de la región norte (*banda roja*); se resalta el empobrecimiento en las tierras raras ligeras (La-Sm), que ocurre de manera progresiva hacia el sur.

Esos datos revelan una progresión norte-sur en la composición isotópica inicial. Los plutones de la parte norte presentan relaciones de estroncio mayores y valores de εNd más negativos que los granitos de la parte sur. Ello sugiere que la composición del magma sufrió importantes modificaciones por asimilación cortical. De nuevo, los granitos de la parte central reflejan firmas intermedias.

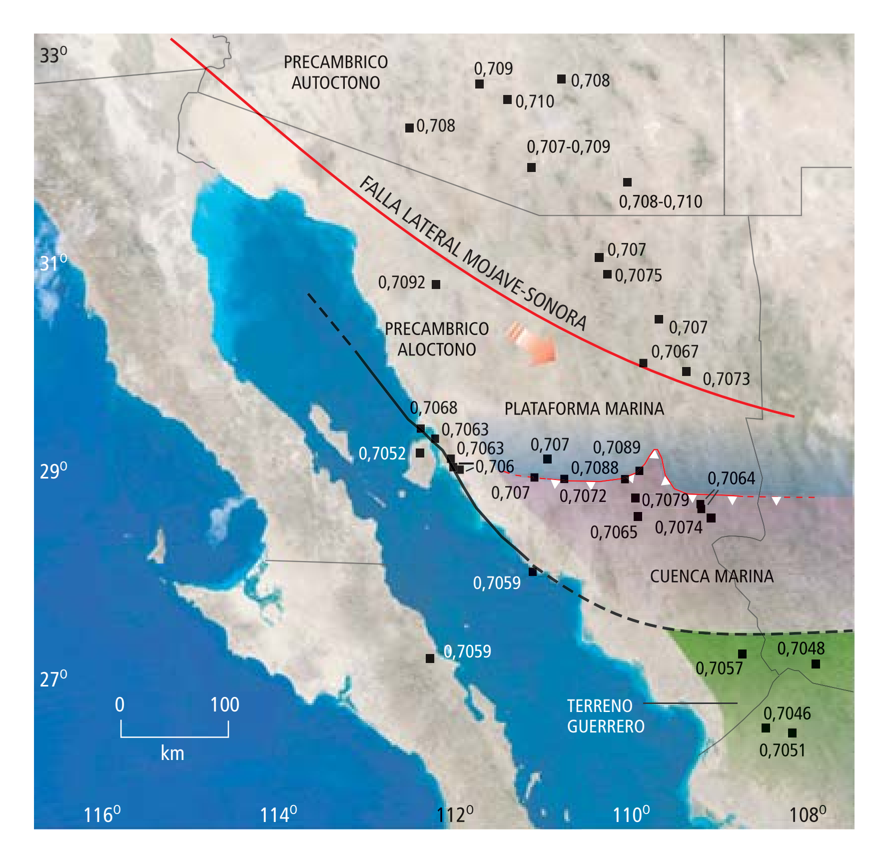
El borde suroeste de Norteamérica

Una de las principales aportaciones de las firmas isotópicas de estroncio y neodimio de los granitos laramídicos estudiados es, sin duda, la definición de la posición del borde del basamento proterozoico de Norteamérica en el noroeste de México. Aunque este límite tectónico se intuía, la falta de

El autor

Martín Valencia Moreno es investigador del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, adscrito a la Estación Regional del Noroeste en Hermosillo, Sonora. Centra su trabajo en el estudio petrogénico de las rocas magmáticas del noroeste de México y los yacimientos minerales asociados.

MARTIN VALENCIA MORENO



5. RELACIONES ISOTOPICAS iniciales de $^{87}Sr/^{86}Sr$ de las rocas graníticas laramídicas de Sonora y áreas adyacentes. Se muestran los rasgos principales del basamento prebatolítico. La curva que se observa a lo largo de la costa y el sur de Sonora representa la línea de Sr 0,706, que corresponde al borde suroeste del basamento proterozoico de Norteamérica.

argumentos geológicos impedía su ubicación exacta.

A partir de los análisis isotópicos realizados en los batolitos cordilleranos del suroeste de los EE.UU., se considera que una relación inicial de $^{87}Sr/^{86}Sr$ igual a 0,706 es característica del límite del basamento proterozoico de Norteamérica. Relaciones menores indican terrenos subyacidos por basamentos más juveniles.

En razón de ese criterio, se interpoló una curva con los datos de los granitos de Sonora; se determinó (de manera indirecta) la posición del borde de Norteamérica en el subsuelo.

De acuerdo con esta configuración, el límite tectónico pasa por el sur de California, en los EE.UU., y sigue a través de la región costera de Sonora en dirección subparalela a la costa; luego, en la región sureña de Guaymas, el límite se dobla hacia el este para seguir una trayectoria en dirección este-oeste por el subsuelo de Chihuahua. El límite isotópico de Sr 0,706 presenta en Sonora un valor análogo de εNd inicial de –3,4, con el que se definió una curva similar.

Origen de los magmas

Según la correlación isotópica de Sr-Nd, los granitos laramídicos estudiados se ubican en sitios con una afinidad tectónica distintiva. Los granitos de la parte sur del cinturón presentan una composición isotópica cercana a la esperada para el global terrestre, pero más parecida a la de las rocas asociadas al manto superior (donde se producen los basaltos tipo MOR, de "Mid-Ocean Ridge") y muy semejante al campo isotópico de las rocas del Terreno Guerrero.

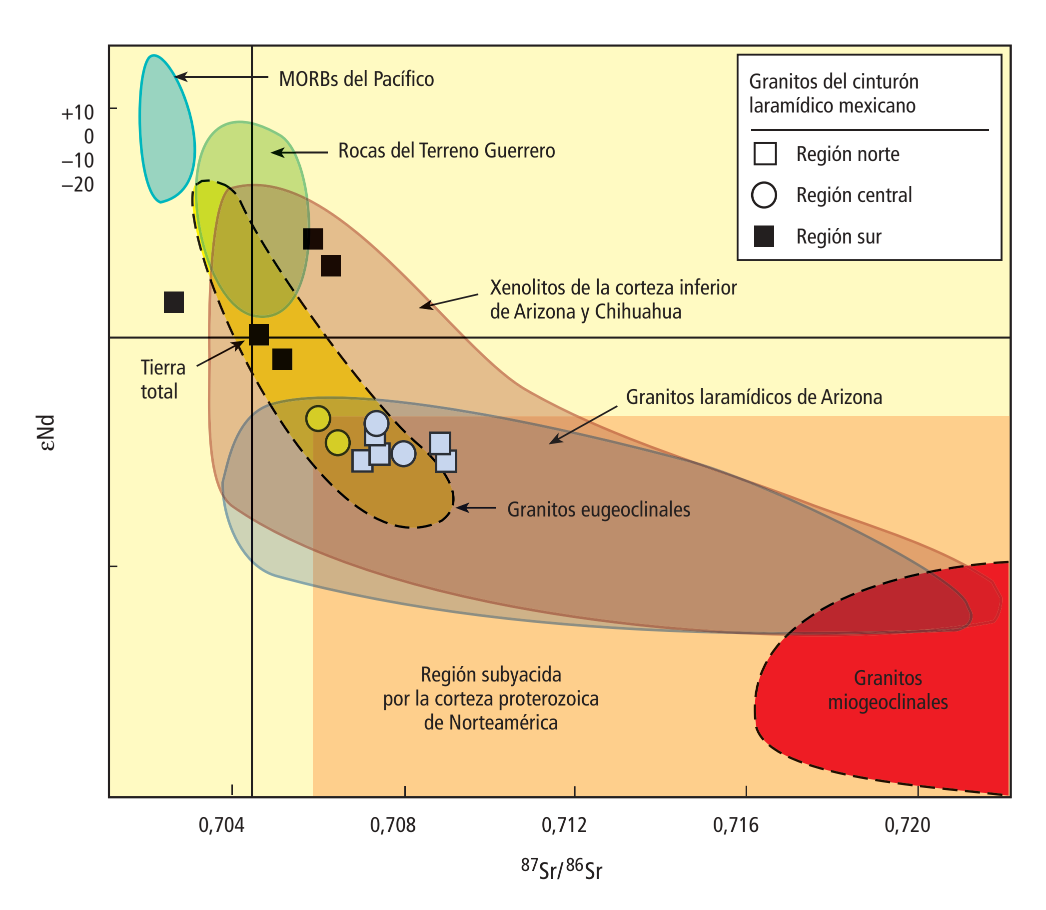
Los granitos de las partes norte y central del cinturón presentan firmas isotópicas más ricas en estroncio radiogénico y valores bajos de εNd, en comparación con la composición de la Tierra, que corresponde al campo dominado por las rocas corticales más antiguas, como las del basamento proterozoico norteamericano.

En general, la firma isotópica de estas rocas guarda semejanza con la de los granitos del Cretácico Tardío y Terciario temprano del suroeste estadounidense; sobre todo con los del sur de Arizona, California y Nevada. De acuerdo con el carácter del basamento eugeoclinal o miogeoclinal intrusionado, en California y Nevada se han considerado dos tipos de granito. El primero, análogo a los granitos de las regiones centro y sur del cinturón estudiado, presenta firmas isotópicas que incluyen todo el rango de las rocas de Sonora. El segundo tipo corresponde a granitos que se han formado por fusión de una corteza antigua; son, por tanto, representativos de la misma. Estas composiciones se observan también en los granitos de Arizona, pero no aparecen representadas en las rocas estudiadas de Sonora; sin embargo, en el centro-norte sonorense existen afloramientos graníticos cuya litología sugiere un origen similar.

De acuerdo con los principales actores del escenario isotópico, dos mecanismos explicarían el origen de los granitos mesozoicos y cenozoicos de la cordillera occidental de Norteamérica. El primero parte de la mezcla de las dos regiones extremas de la Tierra: el manto y la corteza continental antigua. Según los modelos clásicos de cristalización fraccionada con asimilación cortical, el espectro isotópico completo de los granitos responde a la presencia de un magma inicial de origen mantélico similar a un arco volcánico de islas oceánicas, modificado por la asimilación de cantidades variables de materiales de la corteza proterozoica norteamericana. Este mecanismo explicaría la composición de los granitos en la parte norte y central del cinturón laramídico de Sonora; sin embargo, para la parte sur del cinturón se requiere de la participación de un componente cortical más juvenil alojado bajo el Terreno Guerrero.

El segundo mecanismo se basa en la información que aportan numerosos xenolitos de rocas granulíticas máficas e intermedias, que los flujos de basaltos alcalinos recientes llevaron a la superficie. Esos datos abonan la idea de una corteza inferior con composición

MARTIN VALENCIA MORENO; JACQUES DESCLOITRES, MODIS RAPID RESPONSE TEAM, NASA/GSFC (*mapa*)



6. CORRELACION ISOTOPICA de Nd-Sr con la composición de las rocas graníticas de Sonora y el norte de Sinaloa. Sugiere varias vías alternativas para el origen de las rocas. El recuadro de la derecha (*naranja*) corresponde a la región donde se infiere una participación importante de la corteza proterozoica de Norteamérica en la fuente del magma (el límite inferior se define por los valores iniciales de $^{87}Sr/^{86}Sr$ y εNd de 0,706 y –3,4, respectivamente).

isotópica heterogénea, subyacente a la región del sur de Arizona y Chihuahua. Debido a que las firmas isotópicas observadas en los granitos de Arizona guardan una estrecha semejanza con las indicadas por los xenolitos, la simple fusión de esta corteza inferior pudiera ser una fuente plausible para el magma granítico. Por tanto, el modelo no requiere de una participación importante del magma inicial mantélico en la mezcla; lo que no excluye que el magma constituya el motor para la fusión de la base de la corteza.

Los batolitos de Sonora, que presentan una variación isotópica menor, podrían tener un origen similar siempre y cuando el basamento fundido representase una sección homogénea de la corteza inferior. De nuevo, este modelo resulta aplicable para las regiones norte y central del cinturón, mas no para la del sur, debido a la ausencia de un basamento antiguo.

Cabe remarcar también que las edades modelo (la edad a la que el neodimio en una roca de la corteza se separó de la Tierra primitiva), de acuerdo con la curva de evolución del manto superior, son más antiguas en las rocas de la parte norte y central del cinturón (entre 900 y 1100 millones de años), y más jóvenes en la parte sur (cerca de 500 millones de años), con una excepción de 800 millones de años de edad. Esa última edad indica un tiempo notable de residencia para el neodimio en esa zona del cinturón. Quizás implique también la presencia de materiales derivados de una corteza proterozoica retrabajada, posibilidad viable debido a la existencia de restos de basamentos proterozoicos de naturaleza exótica en el sur de México.

En resumen, los batolitos graníticos de Sonora presentan claras variaciones geoquímicas e isotópicas norte-sur que se explican en términos de la composición de la fuente. Los granitos de la parte norte y, en menor proporción, de la parte central requieren un componente cortical en la fuente caracterizada por valores de εNd bajos, relaciones de estroncio elevadas y un enriquecimiento en tierras raras ligeras.

De ese trío de propiedades se infiere que la corteza inferior máfica intermedia revelada por los xenolitos encontrados en rocas volcánicas recientes de Arizona y Chihuahua pudiera constituir una fuente batolítica. Por otro lado, los valores primitivos de los isótopos de estroncio y de neodimio, junto con patrones de tierras raras más planos observados en los granitos de la parte sur, sugieren una mezcla de un magma (derivado del manto empobrecido en tierras raras ligeras) con una corteza en la base del Terreno Guerrero, de composición similar a éste, aunque más antigua.

MARTIN VALENCIA MORENO

Bibliografía complementaria

ORIGIN OF MESOZOIC AND TERTIARY GRANITES IN THE WESTERN UNITED STATES AND IMPLICATIONS FOR PRE-MESOZOIC CRUSTAL STRUCTURE: 1. ND AND SR ISOTOPIC STUDIES IN THE GEOCLINE OF NORTHERN GREAT BASIN. G. L. Farmer y D. J. DePaolo en *Journal of Geophysical Research*, vol. 88, págs. 3379-3401; 1983.

A CHEMICAL AND ISOTOPIC STUDY OF THE LARAMIDE GRANITIC BELT OF NORTHWESTERN MEXICO: IDENTIFICATION OF THE SOUTHERN EDGE OF THE NORTH AMERICAN PRECAMBRIAN BASEMENT. M. Valencia-Moreno, J. Ruiz, M. D. Barton, P. J. Patchett, L. Zürcher, D. Hodkinson y J. Roldán Quintana en *Geological Society of America Bulletin*, vol. 113, págs. 1409-1422; 2001.

GEOLOGY AND GEOCHEMISTRY OF THE COASTAL SONORA BATHOLITH, NORTHWESTERN MEXICO. M. Valencia-Moreno, J. Ruiz, L. Ochoa-Landín, R. Martínez-Serrano y P. Vargas Navarro en *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 40, págs. 819-831. 2003.



¿Cómo surge la conciencia?

Dos esclarecidos neurocientíficos contrastan sus teorías sobre la actividad cerebral que subyace bajo la experiencia subjetiva

Christof Koch y Susan Greenfield

La traducción de los procesos cerebrales en conciencia subjetiva constituye uno de los grandes problemas científicos irresueltos. El método científico ha logrado esbozar los acontecimientos inmediatamente posteriores a la gran explosión e identificar los componentes bioquímicos elementales del cerebro, pero se ha mostrado manifiestamente incapaz de explicar el modo en que se engendra la experiencia subjetiva.

Siendo la neurociencia nuestra profesión, nos propusimos contribuir a la elucidación de este problema. Son muchas las ideas y puntos de vista que compartimos. Entre ellas, una de la máxima importancia: la convicción de que el enigma de la conciencia no corresponde a un problema único; antes bien, engloba múltiples fenómenos pendientes de explicación: la autoconciencia (la facultad de poder examinar nuestros propios deseos y pensamientos), el contenido de la conciencia (aquello de lo que se es consciente en un momento cualquiera) y la forma en que los procesos cerebrales se relacionan con la conciencia y la no-conciencia, entre otros.

¿Dónde, pues, buscar la solución? No se ha alcanzado todavía tanta comprensión de los procesos internos del cerebro como sería necesaria para deletrear el modo en que se *engendra* la conciencia a partir de la actividad química y eléctrica de las neuronas. En consecuencia, el primero de los grandes retos consiste en la determinación de los correlatos neuronales de la conciencia (CNC), vale decir: la actividad cerebral que se corresponde con experiencias conscientes específicas. Cuando nos percatamos de que estamos viendo un perro, ¿qué neuronas cerebrales se han activado y cómo han interaccionado? Si nos sobreviene una pesadumbre, ¿qué ha ocurrido en nuestro cerebro? Ambos autores nos proponemos hallar la equivalencia neuronal de cada experiencia subjetiva. Y es en este punto preciso donde discrepamos.

Nuestras divergencias sobre los CNC salieron a la luz en un animado debate celebrado en la Universidad de Oxford en el verano de 2006, con el patrocinio de la Fundación Ciencia de la Mente de San Antonio. Desde entonces, cada uno de nosotros ha seguido explorando y poniendo en tela de juicio las teorías del otro, un diálogo que ha resultado en este artículo. No obstante, compartimos algo fundamental: nuestras teorías y opiniones emanan primordialmente de la neurociencia, no son sólo filosofía. Ambos hemos examinado una inmensa cantidad de datos neurológicos, clínicos y psicológicos. Nuestras discusiones y discrepancias son fruto de esas observaciones.

— Christof Koch y Susan Greenfield

CHRISTOF KOCH

SU TEORIA: Para cada experiencia consciente, un grupo único de neuronas de regiones cerebrales concretas se activan de manera específica.

Christof Koch

“Las distintas experiencias conscientes están mediadas por grupos específicos de neuronas.”

Susan Greenfield y yo estamos buscando, cada uno por su parte, los correlatos neuronales de las experiencias conscientes (CNC). A partir de éstos, tal vez se deduzcan los mecanismos causales *creadores* de conciencia.

A mi entender, que ha ido evolucionando desde que Francis Crick y yo emprendimos la investigación de la conciencia en 1988, cada percepto consciente (la representación que el cerebro efectúa de los estímulos procedentes de los sentidos) está asociado con una coalición específica de neuronas, que actúan, a su vez, de modo específico. Existe un correlato neuronal peculiar y único para la visión de manchas rojas, otro para la visión de nuestra abuela y un tercero para sentir enfado. La perturbación o interrupción de cualquier correlato neuronal de conciencia altera su percepto asociado o provoca la desaparición del mismo.

En el plano fisiológico, el substrato probable de un CNC consta de una coalición de neuronas piramidales (un tipo de neurona que establece comunicaciones a larga distancia) alojadas en la corteza cerebral. Es posible que la formación de una de esas coaliciones exija tan sólo en torno a un millón de neuronas selectas entre los 50.000 o 100.000 millones que contiene nuestro cerebro. Cuando, pongamos por caso, un conocido entra en una sala llena de gente y nosotros vemos su rostro, una coalición de neuronas se pone súbitamente a parlar de forma concertada, durante una fracción de segundo cuando menos. La coalición se extiende desde la región posterior de la corteza, donde se procesan inicialmente las representaciones de los estímulos visuales, hasta las regiones prefrontales, responsables de proporcionar perspectiva, activar la capacidad de planificación y otras funciones ejecutivas.

Una coalición tal quedaría reforzada si prestásemos atención al estímulo correspondiente a la proyección del rostro sobre nuestra retina: ello intensificaría en las neuronas selectas la amplitud o la sincronía de su actividad. La coalición se mantiene a sí misma e inhibe a otras coaliciones competidoras por medio de retro y proalimentación de señales excitadoras entre las neuronas de las regiones posteriores y frontales de la corteza. Si, de repente, alguien pronuncia nuestro nombre, se forma en la corteza auditiva una nueva coalición neuronal. Esa coalición entra en comunicación bidireccional con las regiones frontocerebrales y enfoca nuestra atención hacia la voz de



SUSAN GREENFIELD

SU TEORIA: Para cada experiencia consciente, neuronas distribuidas por el cerebro se sincronizan en asambleas coordinadas, y se dispersan luego.

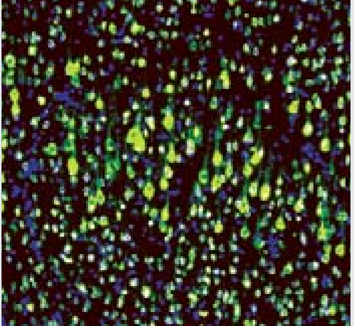
ESTADOS DE CONCIENCIA

¿Qué sucede cuando vemos un perro, oímos una voz, nos invade de repente la tristeza o tenemos otra experiencia subjetiva cualquiera?

MODELO DE KOCH

Una coalición de neuronas piramidales que vinculan las regiones posterior y frontal de la corteza cerebral entra en actividad de una forma propia y exclusiva. Para representar distintos estímulos de los sentidos se activan diferentes coaliciones neuronales. En la corteza de un ratón (*derecha*) esas células piramidales (*fulgor verde*) se encuentran en la capa 5, rodeadas por células no neuronales (*azul*).

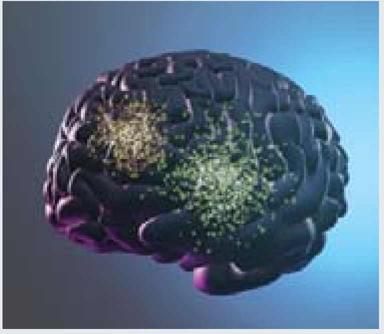




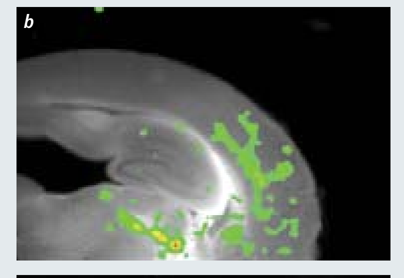
MODELO DE GREENFIELD

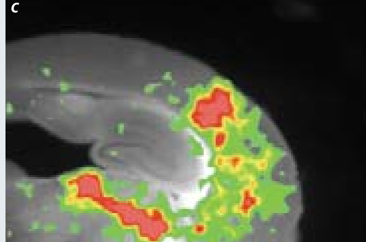
Neuronas distribuidas por todo el cerebro destellan de forma sincrónica (*verde*) y prevalecen hasta que un segundo estímulo hace surgir una segunda asamblea (*naranja*). Diversas asambleas se conjugan y disuelven de un momento a otro. En un cerebro de rata (*abajo*) vemos la formación de una asamblea en la corteza (*a*, *b*), su culminación (*c*) y su desintegración (*d*) en un plazo de 0,35 segundos después de que el tálamo haya sido estimulado eléctricamente.

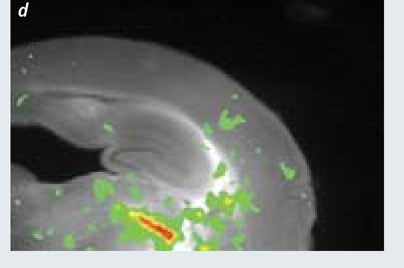












esa persona, a la vez que inhibe la coalición precedente (la representación del rostro de la persona conocida), que desaparece de nuestro campo de conciencia.

La biología nos enseña una lección universal: todos los organismos desarrollan, por vía evolutiva, aparatos o sistemas específicos. Otro tanto vale para el cerebro. Las células nerviosas se han desarrollado en una miríada de formas y funciones, y han creado patrones específicos de interconexión. Esa heterogeneidad se ve reflejada en las neuronas que integran un CNC. Y es en ese punto donde más me alejo de las ideas de Greenfield. Ella sostiene que la conciencia corresponde a una propiedad holística de una gran colección de neuronas en excitación bañadas en una disolución de neurotransmisores. Yo defiendo, en cambio, que son grupos específicos de neuronas los que median y generan las distintas experiencias conscientes.

A no tardar, la capacidad creciente de los neurocientíficos para manipular delicadamente poblaciones de neuronas nos conducirá desde la observación de que un estado consciente particular está asociado con una determinada actividad neuronal hasta la ubicación precisa de la causación, es decir, la observación de una población neuronal que es parcial o totalmente responsable de un estado de conciencia.

Pero, ¿cómo se determina qué conjunto de neuronas, y qué actividad entre ellas, constituye un percepto consciente? ¿Intervienen en un CNC la totalidad de las neuronas piramidales presentes en la corteza cerebral en un momento dado? ¿O se trata sólo de un subconjunto de células, con proyecciones de largo alcance, que establecen comunicación entre los lóbulos frontales y las cortezas sensoriales posteriores? ¿O se trata, por el contrario, de neuronas alojadas en un lugar cualquiera, que se excitan de forma sincrónica?

Gran parte de los trabajos contemporáneos sobre CNC se han centrado en la visión. En psicología de la visión se han refinado técnicas que permiten ocultar objetos (o partes de la escena visual) a nuestra percepción consciente, como hace el ilusionista cuando nos distrae y logra que no veamos lo que está ocurriendo ante nuestros ojos. Tenemos un ejemplo en la supresión por flash, un fenómeno descubierto en 2005 por Naotsugu Tsuchiya (estudiante de doctorado a la sazón) y por mí. La percepción de una imagen pequeña y estática que se presenta a un solo ojo (por ejemplo, un rostro gris, tenue, de gesto enojado, proyectado sobre el ojo derecho) queda totalmente suprimida por la proyección, en destellos sobre el otro ojo, de una riada de manchas de colores que cambian sin cesar. Tal supresión dura minutos, a pesar de que el rostro enoja-

STUART C. SEALFON Y POKMAN CHAN *Escuela de Medicina de Monte Sinaí (corteza de ratón)*; MICHAEL HILL *Universidad de Oxford (imagen de video)*; ALFRED T. KAMAJIAN *(cerebros)*

do se torna perfectamente visible si el sujeto guiña el ojo izquierdo. Aunque en la corteza visual primaria haya legiones de neuronas que se excitan vigorosamente en respuesta a los estímulos procedentes del otro ojo, éstas no contribuyen a la experiencia consciente. Un resultado que cuesta explicar en el marco de la tesis de Greenfield: a saber, que cualquier emisión coherente de señales desde un gran colectivo de neuronas constituye un correlato de conciencia. Se están utilizando ilusiones de ese tipo para hallar CNC en cerebros de monos entrenados y en humanos.

En vida de Crick, él y yo expusimos varias propuestas relativas a la fisiología de la conciencia, basándonos en resultados experimentales. Una de ellas era que los CNC contienen neuronas piramidales que se encuentran estratégicamente alojadas en una zona de la corteza cerebral (la "capa 5"), que es emisora de señales. Esas células dirigen señales hacia otro conjunto de neuronas piramidales situadas en una región distinta y reciben directamente señales procedentes de éstas. Una disposición así propiciaría la instauración de un bucle de realimentación positiva: una coalición de neuronas que, una vez iniciada su excitación, permanecería en tal estado hasta que otra coalición de neuronas la desactivase. Asimismo, esos grupos se excitan durante fracciones de segundo, una escala temporal mucho más pareja de la conciencia consciente que la correspondiente a los meros destellos de neuronas individuales.

Esa forma de entender las redes neuronales se ha visto reforzada por resultados recientes obtenidos por Stuart C. Sealflon, de la facultad de medicina Monte Sinaí, y Jay A. Gingrich, de la Universidad de Columbia. Han demostrado, en ratones transgénicos, que determinados alucinógenos —LSD, psilocibina (que se encuentra en ciertos hongos) y mescalina— actúan sobre una molécula receptora de serotonina que se halla sobre las células piramidales que se apiñan en la capa 5. La hipótesis de que la distorsión mental provocada por los compuestos alucinógenos procede de la activación de un tipo de receptor sobre un grupo específico de neuronas —no del "embrollamiento" holístico de los circuitos cerebrales— sería ulteriormente verificada mediante instrumentos moleculares que activan y desactivan, de forma alternativa, las células piramidales de la capa 5 hasta que se identifique el conjunto exacto de neuronas afectadas.

Una segunda propuesta sobre los CNC que subyacen bajo la conciencia hace referencia al *claustro*, una estructura cuasilaminar contenida en la corteza. Resulta notable que las neuronas que componen el claustro reciban



BRIAN CRONIN

¿Por qué el zumbido de un despertador nos induce el estado de conciencia cuando estamos dormidos (inconscientes)?

La opinión de Koch: Las neuronas del locus cerúleo, una región del tallo cerebral, responden a una señal, súbita y potente, que llega por el nervio auditivo. Esas neuronas actúan de inmediato mediante la emisión de una señal química dirigida al tálamo y a la corteza cerebral. Otras neuronas liberan acetilcolina (un neurotransmisor) por todo el cerebro. El efecto neto es que la corteza cerebral y sus estructuras satélites quedan excitadas. En cuanto ha ocurrido todo esto, un agrupamiento de neuronas de la corteza auditiva, muy extendido y estrechamente interconectado, y sus homólogas de la zona prefrontal y de los lóbulos medial-temporales (responsables de la planificación y la memoria), establecen una coalición estable mediante retroalimentación recurrente. Esa actividad requiere sólo una fracción de segundo; es la causa de que seamos conscientes del sonido de alarma.

La opinión de Greenfield: Cualquier estímulo sensorial vigoroso, como una luz fuerte, inducirá la conciencia, por lo que ninguna región concreta del cerebro es responsable de que nos despertemos. La causa de que la alarma del despertador nos devuelva a la conciencia no es la cualidad del estímulo (auditivo, en este caso), sino su cantidad (sonoridad). Los diversos grados de conciencia se hallan en correlación con asambleas neuronales transitorias, grandes colectivos de neuronas que operan de forma concertada: el tamaño de una asamblea en momentos distintos está determinado por la facilidad con que las neuronas se agrupan en sincronía transitoria. La intensidad del estímulo sensorial reviste una importancia crítica. Viene a ser como lanzar una piedra en una charca: cuanto mayor sea la piedra, mayor será la amplitud de las ondas en el agua. Cuanto mayor la sonoridad de la alarma (o mayor la intensidad de la luz), tanto más probable será que se reclute una asamblea extensa de neuronas; cuanto más extensa la asamblea, tanto mayor será la probabilidad de despertarnos.

señales aferentes desde casi toda la corteza y, a su vez, las emitan también hacia casi todas las regiones. Quizás esa estructura se halla perfectamente situada para vincular la actividad de las cortezas sensoriales a un percepto individual y coherente.

Para que tales ideas prosperen deberán tomarse muestras de las actividades de "parloteo eléctrico" de una cuantía elevada de neuronas y hacerlo en numerosas ubicaciones. Se trata de un trabajo delicado y difícil, pero la miniaturización de los electrodos está empezando a hacerlo posible. Tentativas preliminares confirman que grupos específicos de neuronas expresan los tipos de percepciones que constituyen nuestras experiencias cotidianas.

Ninguna de esas hipótesis da a entender que una neurona, un ciento o un millón de neuronas que vivan en una placa de Petri sean conscientes. Las neuronas forman parte de vastas redes; sólo en tal contexto generan experiencia consciente. De forma análoga, aunque el ADN de una célula deletrea la composición de las proteínas de nuestro organismo, la construcción y el mantenimiento de esas proteínas requiere la presencia en la célula de otras muchas moléculas.

La extensión y procedencia, u origen, variables de las coaliciones de neuronas explican también los distintos contenidos conscientes de niños, adultos y animales. La existencia misma de una coalición cualquiera depende, a su vez, de la existencia de circuitos de excitación en el tallo cerebral y el tálamo (que retransmite los impulsos sensoriales a la corteza), que se encuentren continuamente activos y que perfundan la corteza y sus estructuras satélites con neurotransmisores y otras sustancias.

Si los circuitos de excitación de una persona se mantienen silentes —como sucede cuando se está profundamente dormido o bajo anestesia, o cuando se ha sufrido un trauma similar al de Terri Schiavo, una mujer que cayó en un estado vegetativo persistente y fue objeto de gran atención mediática— no puede surgir ninguna coalición estable de neuronas corticales. La persona no está consciente.

Aunque ese modelo puede ponerse a prueba mediante experimentos fisiológicos, una crítica válida es que no constituye una teoría fundada en una serie de principios; es decir, no pronostica qué tipo de sistema posee experiencias conscientes. La neurociencia tiene necesidad de una teoría que pronostique, a partir de magnitudes mensurables, cuál de los siguientes organismos es consciente: una mosca de la fruta, un perro, un feto humano a los cinco meses de su concepción, un enfermo de Alzheimer que no responde, la red de Internet y así sucesivamente.

Algunos expertos, entre ellos, Giulio Tononi, de la Universidad de Wisconsin en Madison, trabajan ya en tales teorías. Pero nuestra ignorancia sobre el cerebro es todavía tan vasta, que cabe sólo la conjetura. Serán de alguna ayuda las hipótesis concretas que puedan verificarse con las técnicas disponibles hoy. Como a Francis Crick le gustaba recordar, lo que en 1953 les llevó a James Watson y a él hasta el descubrimiento de la estructura doblemente helicoidal del ADN fueron los experimentos, no una teoría sobre la codificación molecular de la información genética.

Mi explicación consiste, fundamentalmente, en que son diferencias en la actividad neuronal —cualitativas, no cuantitativas— las que originan la conciencia. Lo que importa no es el mero número de neuronas implicadas, como afirma Greenfield, sino la complejidad de la información que éstas representan. Para cada percepto concreto es necesaria una red específica de neuronas, no una colección cualquiera de neuronas que se tornan sumamente activas. Además, para una conciencia plena, una colección de neuronas debe abarcar la representación sensorial de la región posterior de la corteza, así como las estructuras frontales que intervienen en la memoria, la planificación y el lenguaje.

El cerebro no funciona a causa de sus propiedades en bruto, sino porque las neuronas están interconectadas en configuraciones asombrosamente específicas e idiosincrásicas. Dichas configuraciones son reflejo de la información acumulada por un organismo a lo largo de su periplo vital, así como la de sus antepasados, que se halla plasmada en genes. Lo crucial no es que un número suficiente de neuronas se encuentren conjuntamente activas, sino que las neuronas activas sean las que deben.

Susan Greenfield

"La conciencia está generada por un incremento cuantitativo en la actividad holística del cerebro."

Si los correlatos neuronales de la conciencia no fuesen más que descargas de unas ciertas neuronas, y no de otras, como Christof Koch propone, la conciencia residiría en las neuronas mismas. Koch no ofrece, empero, ninguna explicación que mencione las propiedades cualitativas de tales neuronas o regiones neuronales, que las diferencien de otras. Además, si ni siquiera un millón de neuronas pueden generar conciencia sin formar parte de "vastas redes", entonces la identificación de CNC, tarea onerosa, se sustituye por la descripción de lo que tales redes son.

Los autores

Christof Koch es profesor de biología cognitiva y conductual en el Instituto de Tecnología de California, donde también ha dirigido, durante más de veinte años, investigaciones sobre las bases neurológicas de la atención visual y de la conciencia. **Susan Greenfield** es profesora de farmacología en la Universidad de Oxford, directora de la Regia Institución de Gran Bretaña y miembro de la Cámara de los Lores en el Parlamento británico. Sus investigaciones se centran en mecanismos cerebrales novedosos, entre ellos, los subyacentes a enfermedades neurodegenerativas.

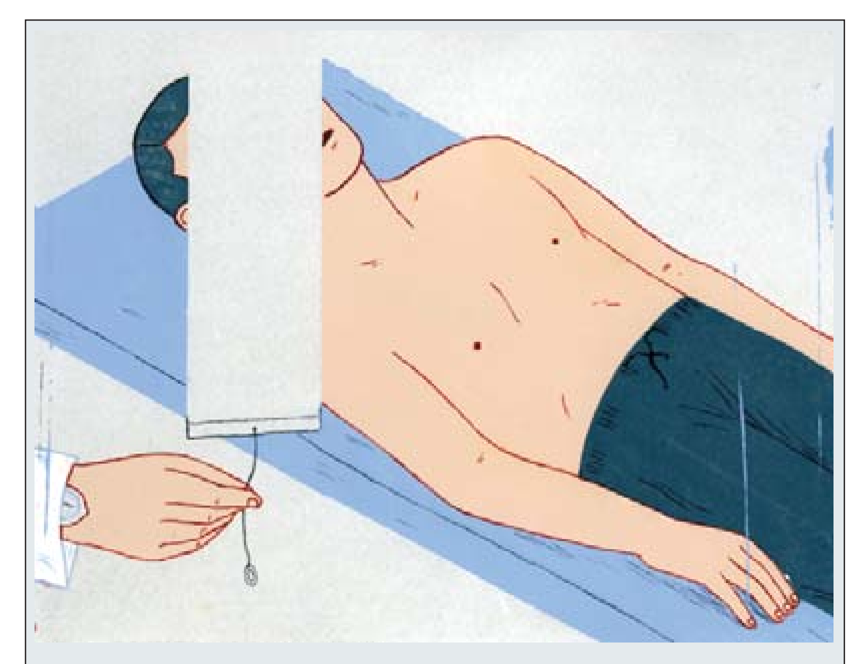
Al examinar conexiones cerebrales específicas correspondientes a diversas formas de conciencia, Koch peca —en el siglo XXI— de una variante de la frenología, según la cual las distintas funciones se hallan en relación directa con las distintas regiones cerebrales, sobre todo, con la corteza. Su entusiasmo por la corteza debería ser más atemperado, pues las aves carecen de corteza cerebral y, aun así, se cree que poseen conciencia. Aun cuando tal compartimentación fuese posible, seguiría sin explicar el modo en que aparece la conciencia.

A mi entender, la conciencia no se escinde en experiencias paralelas y diferentes. Sabemos, de hecho, que la estimulación visual modifica nuestra audición y recíprocamente. Tal fusión de los componentes sensoriales habla en contra de nociones como las de conciencia visual aislada. Y lo que es de máxima importancia: o se está consciente o no se está. En el laboratorio de Koch, los probandos permanecen conscientes mientras se efectúan los experimentos con sus neuronas; por consiguiente, lo que los experimentadores manipulan no es el estado de conciencia, sino el *contenido* de esa conciencia. Las explicaciones que se deduzcan constituyen en realidad incursiones en el problema de la atención. (La pregunta, "¿Qué es la atención?" es válida, sin duda, pero difiere de la cuestión "¿Qué es la conciencia?") Yo sostengo que, para definir los CNC, resulta forzoso elucidar en qué se diferencian los estados de conciencia y de inconciencia.

Parto de la hipótesis de que no existe una cualidad "mágica" e intrínseca en ninguna región cerebral o conjunto de neuronas que sea responsable de la conciencia. La clave reside en el *proceso* en sí. Y para que tal proceso neuronal constituya un correlato robusto de la conciencia, debe poder explicar diversos fenómenos cotidianos: entre ellos, la eficacia de un reloj despertador, la acción de los anestésicos, las diferencias entre sueño y vigilia, la autoconciencia, las diferencias entre las conciencias animal y humana y la posible existencia de conciencia fetal. Una concepción más plausible de la conciencia partiría de que ésta no es generada por una propiedad cualitativamente distinta del cerebro, sino por un incremento cuantitativo de la actividad holística del mismo. La conciencia aumenta con el desarrollo del cerebro.

Ahora bien, ¿cuál es el mecanismo neuronal clave en ese proceso? La tentativa de mostrar correlatos de la conciencia asociados a procesos ha sido inspirada por diversos hallazgos, entre ellos, los del neurofisiólogo alemán Wolf Singer. Singer demostró que una población ingente de neuronas alojadas entre el tálamo y la corteza cerebral destellaban al unísono, de forma transitoria, a una frecuencia de 40 veces por segundo. Pero dado que esa misma actividad aparece en un corte tomográfico del mismo tejido mantenido con vida en el laboratorio (*in vitro*), la conciencia deberá tener como requisito previo alguna otra condición adicional.

Rodolfo Llinás, del Hospital de la Universidad de Nueva York, ha propuesto en fecha



BRIAN CRONIN

¿Cómo actúan los anestésicos?

Koch: Los anestesistas suelen administrar una variada colección de fármacos. Mas todos ellos sirven para abolir la conciencia. Se pensaba que los anestésicos interferían de forma sistémica con lípidos de la membrana celular de las neuronas, pero ahora sabemos que esos fármacos se interponen ante diversos procesos neuronales mediante la unión a ciertas proteínas de membrana. La supresión de la conciencia no se debe a un mecanismo único y exclusivo. Pese a ello, entre las causas principales de la anestesia se cuenta la intensificación de la inhibición sináptica, o la reducción de la excitación sináptica, en grandes regiones del cerebro. La actividad cerebral no queda totalmente extinta, pero la capacidad de los grupos de neuronas para formar coaliciones estables sí resulta gravemente mermada. Cuando las neuronas que abarcan las regiones posteriores y frontales de la corteza cerebral no pueden establecer comunicación sincronizada, la conciencia resulta imposible.

Greenfield: Los anestésicos no desconectan ninguna región cerebral concreta: lo que hacen es deprimir la actividad neuronal en diversas regiones repartidas por todo el cerebro. Por consiguiente, esos fármacos logran su efecto mediante la alteración de una propiedad emergente del cerebro holístico: las asambleas neuronales. Dado que los anestésicos reducen el tamaño de tales asambleas neuronales, rebajan el grado de conciencia, hasta hacerlo inexistente. Ese planteamiento explica también los distintos estadios de conciencia que se dan mientras la anestesia va haciendo efecto, como la hiperexcitabilidad y el delirio. Las personas cuyas conexiones neuronales operan por debajo de lo normal y que, por consiguiente, cuentan con asambleas de tamaño reducido, exhiben a menudo emociones intensas y escaso juicio; vale decir, exactamente los tipos de estado que exhiben numerosos pacientes conforme la anestesia les hace efecto y sus asambleas neuronales pierden tamaño.



BRIAN CRONIN

¿Por qué existe una diferencia subjetiva entre el sueño y la vigilia?

Koch: Aunque el cerebro se mantiene sumamente activo durante la fase del sueño con movimientos oculares rápidos (asociada, en su mayor parte, con sueños vívidos), la pauta regional de actividad cerebral es totalmente distinta de la correspondiente a la vigilia. En particular, el sistema límbico (responsable de las emociones y los recuerdos) presenta una actividad intensa, pero las porciones de los lóbulos frontales que participan en el pensamiento racional se hallan amortiguadas. En el sueño y la vigilia se forman coaliciones de neuronas; pero se trata de neuronas ubicadas en diversas partes del cerebro. En las coaliciones de la vigilia participan numerosas neuronas de la corteza prefrontal, en la que se imponen la razón y la coherencia narrativa para ordenar las percepciones; durante el sueño, en cambio, tal actividad está notoriamente ausente. Esas características reflejan el contenido de los sueños, que a menudo resultan extravagantes y de vigoroso contenido emocional.

Greenfield: Es sumamente probable que los sueños se hallen en correlación con asambleas de neuronas mucho menores que las que se dan mientras estamos despiertos. Esas asambleas serían de menor tamaño porque no existen estímulos externos que hagan participar a grandes números de neuronas. El reclutamiento transitorio de neuronas durante los sueños está gobernado, pues, por respuestas a actividades cerebrales intrínsecas y espontáneas. Y dado que las asambleas no están suscitadas por una narrativa secuencial de acontecimientos del mundo exterior, los vínculos entre ellas son precarios, idiosincrásicos o inexistentes, lo que convierte a los sueños en una serie aleatoria de imágenes o sucesos. La carencia, durante el sueño, de conexiones neuronales extensas y operativas explicaría, asimismo, la notoria ausencia de verificaciones y compensaciones, funciones cognitivas propias del estado de vigilia del adulto.

reciente que esas ráfagas coordinadas y transitorias establecen dos bucles complementarios entre el tálamo y la corteza cerebral, que operan en conjunción para mantener la conciencia: un sistema "específico" asociado al contenido de la conciencia y un sistema "inespecífico" asociado al despertar y la alerta de la conciencia. Esa descripción explica cabalmente por qué la enérgica llegada de las señales de un despertador desencadena la conciencia plena. Además, el modelo de Llinás distingue entre la conciencia de los sueños y la conciencia de la vigilia; en los sueños no existe una entrada sensorial que alimente el bucle del despertar, por lo que funciona sólo el bucle de contenidos.

El problema central estriba en que los modelos desarrollados por Llinás y otros investigadores conciben la conciencia en una situación de todo o nada. No alcanzan a describir de qué modo logra el cerebro acomodarse al flujo y reflujo de un estado de conciencia continuamente variable.

Por mi parte, me inclino por una segunda posibilidad. Es sabido, desde hace más de un decenio, que la actividad de decenas de millones de neuronas se sincroniza durante unos pocos cientos de milisegundos, para desorganizarse luego en poco más de un segundo. Tales "asambleas" de células coordinadas varían sin cesar en las escalas espacial y temporal que se precisan para experimentar la conciencia del "aquí y ahora." Redes neuronales de amplia variación se ensamblan, se desensamblan y se vuelven a ensamblar en coaliciones exclusivas para cada momento. Según mi modelo, la conciencia varía de forma gradual desde un momento al siguiente; el número de neuronas activas en un ensamblaje está en correlación con el grado de conciencia presente en un momento dado cualquiera.

Semejante correlato neuronal de la conciencia (la asamblea transitoria) explicaría todos los fenómenos de la lista anterior. La eficacia de un despertador se debe a una entrada sensorial muy vigorosa que provoca el disparo de una asamblea de gran tamaño y sincrónica. Los sueños difieren de la vigilia en que aquéllos corresponden al resultado de una pequeña asamblea gobernada por estímulos internos débiles, mientras que la vigilia lo es de asambleas mucho mayores, excitadas por estímulos externos. Los anestésicos limitan el tamaño de las asambleas y, al hacerlo, inducen el estado de inconciencia. La autoconciencia aparece sólo en un cerebro de gran tamaño, lo suficientemente interconectado para poner a punto extensas redes neuronales. El grado de conciencia de un animal o de un feto humano depende, asimismo, de las dimensiones de sus asambleas neuronales.

Recuérdese que ni Koch ni yo nos proponemos explicar *cómo* aparece la conciencia. No estamos tratando de hallar la solución de lo que David Chalmers ha dado en llamar "el problema nuclear", a saber, la determinación del modo en que fenómenos fisiológicos que acontecen en el cerebro se traducen en lo que *nosotros* experimentamos como conciencia. Lo que estamos buscando es una correlación, una forma de mostrar de qué modo se corresponden los fenómenos cerebrales y las experiencias subjetivas, sin identificar el paso intermedio y crucial de cómo un fenómeno es causa de una experiencia. Las asambleas neuronales no "crean" conciencia; constituyen, más bien, indicadores de grados de conciencia. Dado que el tamaño de una asamblea y el correspondiente grado de conciencia son resultado de una variedad de factores psicológicos (el grado de conectividad, la intensidad de los estímulos y la competición con otros ensamblajes), cada factor podría manipularse experimentalmente. La capacidad del modelo "asambleario" para generar hipótesis falsables *y* dar cuenta de la diversidad de fenómenos asociados a la conciencia le confiere, sin duda, una potencia especial.

Una crítica evidente al modelo de ensamblaje —que Koch ya planteó durante nuestro debate en Oxford— es que se limita a postular que "el tamaño lo es todo". Pero la mayor parte de la ciencia se ocupa, de hecho, de "lo mensurable"; es decir, de la cuantificación objetiva de las observaciones. En ciencia, el tamaño lo *es* todo. Otros escépticos afirman que la noción de asamblea (o ensamblaje) es demasiado imprecisa. Sin embargo, varios investigadores han revelado caracterizaciones detalladas de mecanismos neuronales que subyacen a la generación de asambleas que duran menos de un segundo, entre ellos, Amiran Grinvald, del Instituto Weizmann de Ciencia de Rehovot, Ole Paulsen, de Oxford, y John G. Jefferys, de la Universidad de Birmingham.

Los ensayos en humanos deberán esperar a que técnicas de formación de imágenes, no invasivas y más refinadas, alcancen una resolución temporal conmensurable con la escala cronológica de la formación y disolución de asambleas neuronales (milésimas de segundo). Una vez disponibles dichas técnicas, debería ser posible la observación de asambleas que guarden correlación con las experiencias subjetivas del dolor neuropático, la depresión o la esquizofrenia, por citar tres ejemplos. Ello no obstante, se ha observado ya en acción el modelo asambleario. Toby Collins y otros miembros de mi grupo de Oxford descubrieron en 2006 que, en ratas, la formación, la actividad y la duración de asambleas muestra una correlación con la acción de anestésicos. Observaciones preliminares en nuestro laboratorio hacen ver asimismo que el número de neuronas activas en asambleas de la corteza sensorial de una rata anestesiada es reflejo del grado de anestesia. Hace unos pocos meses, Subhojit Chakraborty, otro miembro de mi equipo, demostró sobre ratas que las asambleas de los sistemas visual y auditivo podrían servir de base sólida para distinguir la subjetividad de la visión frente a la de audición.

Otras críticas hacen alusión al tiempo y al espacio. Sea la epilepsia. Aquí, una asamblea neuronal de larga duración sostiene el ataque, lo que se iguala a una *pérdida* de conciencia. Pero la razón principal de que las asambleas constituyan CNC es lo efímero de su carácter: un ataque epiléptico actúa a modo de mecanismo de bloqueo que impide esa transitoriedad, lo que permite que una determinada asamblea perdure un tiempo varios órdenes de magnitud mayor de lo normal. Collins, Michael Hill, Eleanor Dommett y yo hemos propuesto en un artículo reciente una hipótesis semejante: a saber, que también los anestésicos operarían como mecanismo obstructor.

Asimismo, se objeta que el modelo asambleario no posee propiedades espaciales: no hay un *locus* anatómico determinado. Pero con demasiada frecuencia se le confiere una importancia excesiva a la localización, como un fin en sí misma. No hay necesidad de que ninguna función cerebral dada se ubique en un "centro"; mucho menos en el caso de la conciencia.

Un supuesto más plausible consistiría en que un gran número de regiones cerebrales distintas, al generar ensamblajes efímeros, convergiesen (en calidad de señales aferentes) en una multitud espacio-temporal. La dificultad presente es que no podemos describir tal multitud mediante las técnicas experimentales disponibles. Cabría quizá la posibilidad de elaborar un modelo matemático; tales modelos y sus interacciones podrían abrir nuevos caminos por los que avanzar.

Un último problema, que se aplica a los CNC en el nivel basal, consiste en hallar la forma de uncirlos para arar en la gran cuestión: la determinación del modo en que los fenómenos fisiológicos que tienen lugar en el cerebro se traducen en lo que nosotros experimentamos como conciencia. No nos hallaremos en situación de encontrar una solución hasta que sepamos qué tipo de prueba sería satisfactoria: ¿Un escáner cerebral, una rata amaestrada, un robot, una fórmula matemática? O tal vez, un cambio inducido en el estado subjetivo propio, como, por ejemplo, la manipulación del cerebro de Koch para que experimentase el mundo al igual que yo, y, por tanto, estuviera de acuerdo conmigo.

Bibliografía complementaria

The Private Life of the Brain. Susan Greenfield. John Wiley & Sons, 2000.

A Framework for Consciousness. Francis Crick y Christof Koch en *Nature Neuroscience*, vol. 6, págs. 119-126; febrero, 2003.

The Quest for Consciousness: A Neurobiological Approach. Christof Kock. Roberts & Company Publishers, 2004.

A Neuroscientific Approach to Consciousness. Susan A. Greenfield y T. F. T. Collins en *Progress in Brain Research*, vol. 150, págs. 11-23; 2005.

Los autores desean agradecer su apoyo a Joseph Dial, de la Fundación Ciencia de la Mente. Susan Greenfield manifiesta su gratitud a Michael Hill, Nicholas Shea y Kathleen Taylor por sus perspicaces observaciones.

LA EDAD DE DIAMANTE DE LA ESPINTRONICA

Dispositivos electrónicos cuánticos que controlan los espines de los electrones podrían facilitar la creación de computadores cuánticos a temperatura ambiente. Estarían hechos de diamante

David D. Awschalom, Ryan Epstein y Ronald Hanson

CONCEPTOS BASICOS

- Los electrones tienen a la vez carga y espín, pero sólo los dispositivos de la espintrónica explotan las dos características simultáneamente para alcanzar innovadoras capacidades.
- La espintrónica nos aporta hoy día cabezas lectoras de discos duros y chips de memoria permanente. Mañana podría tal vez propiciar computadores de puesta en marcha instantánea con chips reconfigurables.
- El diamante sintético semiconductor puede ser el nuevo silicio para una futura era de la espintrónica cuántica, técnica que, al manipular espines individuales, posibilita los computadores cuánticos y otros dispositivos de información cuántica.

Al diamante le gusta distinguirse; por su dureza y su conductividad térmica, las mayores entre los materiales sólidos; por su transparencia a la luz ultravioleta. Y ahora va camino de distinguirse también en la electrónica del estado sólido, gracias a nuevas técnicas que forman diamantes sintéticos de gran pureza y de un solo cristal, en los que insertan impurezas adecuadas (*dopaje*). El diamante puro es un aislante eléctrico, aunque dopado puede convertirse en un semiconductor de características excepcionales. Vale entonces para detectar luz ultravioleta, para construir diodos emisores de luz ultravioleta y óptica, para la electrónica de microondas de alta potencia. Pero la aplicación más apasionante es la espintrónica cuántica, que quizá haga factibles un computador cuántico práctico, capaz de cálculos imposibles para los computadores ordinarios, y unas comunicaciones ultraseguras.

La espintrónica es una forma avanzada de electrónica que controla no sólo la carga eléctrica de los electrones (como en la electrónica ordinaria), sino también su espín, la propiedad por la que se comportan como minúsculas barras magnéticas. Es probable que su ordenador contenga ya la primera y más rudimentaria aplicación comercial de la espintrónica: desde 1998, las cabezas lectoras de los discos duros se sirven de un fenómeno espintrónico, la magnetorresistencia gigante, para detectar los dominios magnéticos microscópicos que en el disco duro representan los 1 y los 0 de los datos que contiene. [Albert Fert y Peter Grünberg han recibido el premio Nobel de física de 2007 por haber descubierto ese fenómeno.]

Otro dispositivo espintrónico, que se incorporará a los ordenadores de los próximos años, son las memorias magnetorresistivas de acceso aleatorio (MRAM). Como en un disco duro, las MRAM almacenan la información en forma de magnetización; el almacenado, pues, es permanente: los datos no se pierden cuando se desconecta la fuente de energía del dispositivo. La lectura se hace eléctricamente, como en cualquier otra memoria basada en una carga [*véase* "Espintrónica", por David D. Awschalom, Michael E. Flatté y Nitin Samarth; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2002]. Freescale Semiconductor, una filial de Motorola, puso a la venta la primera MRAM en el año 2006.

Los chips de memoria permanente podrían llevar a ordenadores que no necesitarían recargar laboriosamente los programas desde un disco duro cada vez que se los conecta. En una fracción de segundo estarían listos para proseguir desde el estado donde se encontraban cuando se los apagó (como en los actuales dispositivos móviles) porque todos los programas y los datos necesarios seguirían listos, esperando en el chip. Técnicas espintrónicas más avanzadas, aún en las primeras etapas de investigación —los transistores de espín, que con el espín controlarían el flujo de corriente—, posibilitarían que los chips de

circuitos lógicos de los ordenadores se reconfiguraran sobre la marcha.

Espintrónica cuántica

Las cabezas lectoras y chips de MRAM representan una clase de espintrónica en la que los espines de grandes números de electrones se alinean de la misma manera, como una colección de trompos que girasen en el mismo sentido. De esos electrones se dice que son de espín polarizado. De ordinario, atraviesan cierta parte del dispositivo, en una corriente de espín polarizado, o simplemente corriente de espín, que recuerda mucho a un haz de luz polarizada. Han abundado los avances interesantes en esta área en los últimos años, entre ellos el descubrimiento de maneras de generar y manipular la polarización del espín en semiconductores sin tener que recurrir a materiales magnéticos o a cableados voluminosos que generen un campo magnético. En particular, nuestro grupo, entre otros, ha observado un fenómeno que quizá llegue a ser muy útil, el efecto Hall de espín (*véase el recuadro* "Control colectivo de espines").

Mucho más lejos del comercio se halla una segunda clase de espintrónica, la espintrónica cuántica, que manipula los electrones, uno a uno, para explotar las características cuánticas del espín. Quizá proporcione una manera práctica de procesar información cuántica. Esta sustituye los 0 y los 1 de la computación ordinaria con bits cuánticos, o qubits, capaces de ser, en "superposición cuántica", 0 y 1 simultáneamente [*véase* "Reglas para un mundo cuántico complejo", por Michael A. Nielsen; Investigación y Ciencia, enero 2003, y "Procesamiento cuántico de la información", por Antonio Acín; Investigación y Ciencia, septiembre 2006].

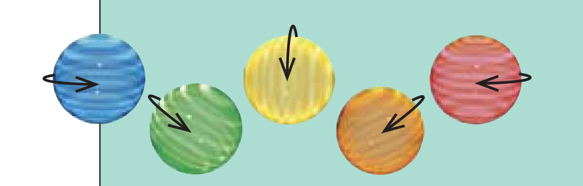
Los computadores cuánticos, en caso de que se llegue a construirlos, sacarían partido de las superposiciones de los qubits para realizar una especie de procesado paralelo, que resultaría sumamente eficaz en ciertas tareas; por ejemplo, para la búsqueda en bases de datos y la factorización de grandes números. La eficiente factorización de números es muy importante porque dejaría obsoletos los códigos criptográficos, muy utilizados, por ejemplo, en la comunicación segura por Internet. Cualquiera que contase con un computador cuántico (una agencia de espionaje, la policía o una gran empresa) podría descifrar a voluntad un número incontable de mensajes secretos.

A buen seguro, el impacto mayor de un futuro computador cuántico residiría en su capacidad única de simular otros sistemas cuánticos, tarea para la que los ordenadores actuales son pésimos. Se requerirían simulaciones cuánticas, por ejemplo para comprender el comportamiento de la materia a escala nanométrica. El conocimiento así adquirido aportaría enormes avances en física, química, ciencia de materiales y biología.

Esta perspectiva ha incitado una competición mundial en pos del sistema de alma-



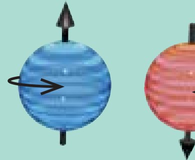
EL ESPIN Y SUS USOS

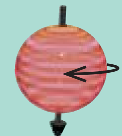


¿QUE ES EL ESPIN?

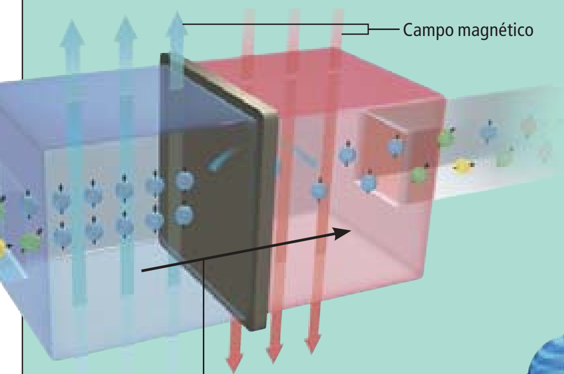
Además de su masa y de su carga eléctrica, los electrones tienen una cantidad de momento angular intrínseco, el espín, casi como si fueran minúsculas bolas que giran.

El espín se representa como un vector. Para una esfera que gire “de oeste a este” el vector señala “al norte”, o “arriba”. Apunta “abajo” para el espín opuesto.





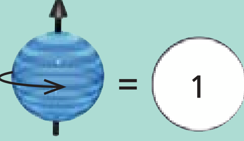
Unión túnel magnética

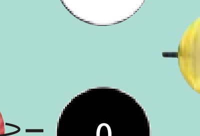


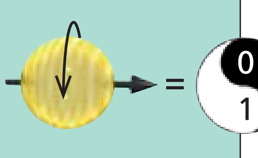
DOS TIPOS DE ESPINTRONICA

La primera clase de dispositivos de la espintrónica utiliza corrientes eléctricas de espín polarizado, en las cuales los electrones tienen sus espines alineados. Los primeros de estos dispositivos, por ejemplo las uniones túnel magnéticas (*izquierda*), polarizan los electrones con campos magnéticos. Ya están disponibles comercialmente.

La segunda clase controla electrones individuales. Con ellos representa bits cuánticos (qubits) y procesa información cuántica. El espín “arriba” es un 1 y el espín “abajo” un 0. Un electrón inclinado es una superposición cuántica de 0 y 1. Estos dispositivos siguen siendo puramente experimentales. Entre ellos se cuenta la espintrónica basada en el diamante.







JEAN-FRANCOIS PODEVIN

cenar y procesar información cuántica más conveniente. Las unidades más avanzadas de procesado de información cuántica hasta la fecha son probablemente los espines de iones atrapados en campos electromagnéticos. Pero estos sistemas presentan un inconveniente: requieren un vacío ultraalto y complejas arquitecturas en las trampas que retienen las partículas en un lugar, aisladas de perturbaciones. El desarrollo de chips que contengan números grandes de tales trampas encuentra imponentes dificultades. En cambio, los qubits de estado sólido, que residen directamente en un sustrato sólido, permitirían aprovechar las décadas de experiencia en la fabricación de chips semiconductores.

Con todo, muchos problemas difíciles han venido acosando a quienes perseguían construir un computador cuántico de estado sólido: ¿Podrá actuarse sobre los espines de los sólidos uno a uno? ¿Se encontrarán las interacciones que construyan, de manera fiable, puertas lógicas cuánticas? ¿Mantendrán los espines de los sólidos la información cuántica el tiempo suficiente para realizar un número útil de operaciones con esa información? En los últimos años, ese haz de preguntas ha recibido respuestas afirmativas. Y uno de los materiales más prometedores para la provisión de los espines ha resultado ser, por sorprendente que pareciese, el diamante.

El brillo de los diamantes

El diamante que utilizamos en nuestros experimentos es muy diferente de las chispeantes gemas de las joyerías. Avances recientes en la ciencia de materiales permiten sintetizar finas películas de diamante —de algunos cientos de nanómetros de espesor extendidos sobre muchos centímetros cuadrados— mediante un depositado químico de vapor. En este proceso, un gas de moléculas que contengan carbono (a menudo metano) e hidrógeno se descompone en átomos individuales (por ejemplo, mediante irradiación de microondas de alta potencia), de modo que los átomos de car-

bono se depositen en un sustrato de silicio. Aunque el diamante que se forma puede ser extremadamente puro, consta a menudo de muchos cristalitos, o granos, cuyo tamaño oscila entre nanómetros y micras, en razón de las condiciones de la cámara.

El funcionamiento óptimo del dispositivo viene generalmente de usar un diamante de un solo cristal, en el que la red tetraédrica de átomos de carbono, característica del diamante, no está interrumpida por los límites desordenados de los granos, que degradan la calidad del material tanto para la óptica como para la electrónica. La capacidad de moldear de muchas formas el diamante ejercerá, probablemente, un efecto profundo en la electrónica, común y cuántica.

Una característica del diamante clave para la electrónica cuántica es la gran cantidad de energía que se necesita para desalojar un electrón, de modo que pueda así fluir por el material. Los estados en que pueden hallarse los electrones de un sólido se representan como bandas de diferentes energías que forman una escala de peldaños espaciados de manera irregular. Para los semiconductores, las dos bandas importantes son la banda de valencia, la más elevada que contiene electrones ligados, y la banda de conducción, vacía e inmediatamente superior, en la que los electrones pueden fluir con libertad. El tamaño del intervalo de energía, o intervalo de banda, entre las dos bandas es, en el diamante, de 5,5 electronvolt, alrededor de dos veces más energía que la contenida en un fotón de luz visible y cinco veces mayor que el intervalo de banda del silicio.

En general, los electrones no pueden tener en un semiconductor una energía que caiga

POSIBLE CON LA ESPINTRONICA

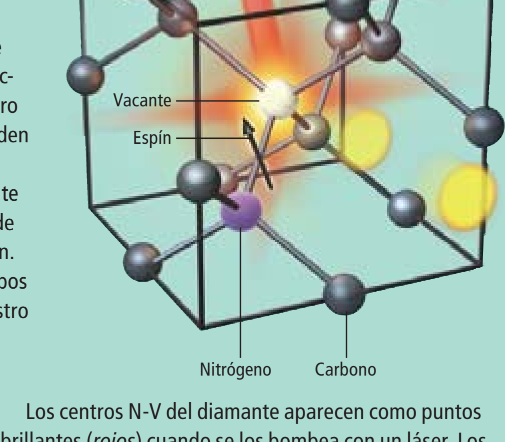
- Muy altas densidades de almacenamiento de datos en discos duros.
- Chips de memoria no volátiles.
- Computadores que se ponen en marcha al instante.
- Chips que, a la vez, almacenan y procesan datos.
- Chips que funcionan a más altas velocidades y consumen menos energía que los ordinarios.
- Chips con puertas lógicas que se pueden reconfigurar sobre la marcha.
- Criptografía cuántica y computación cuántica a temperatura ambiente.

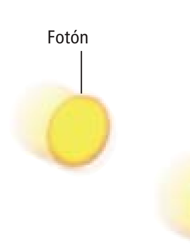
UNA IMPUREZA MAGICA

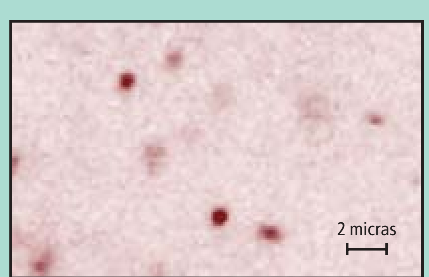
Como con los semiconductores de la electrónica común, la clave para que el diamante valga para la espintrónica cuántica es doparlo con una impureza, en este caso un "centro de nitrógeno y vacante (N-V)".

En un centro N-V, dos puntos adyacentes en la red tetraédrica de átomos de carbono del diamante se alteran. Uno tiene un átomo de nitrógeno en vez de uno de carbono, el otro un espacio vacante. Los electrones orbitan alrededor de la vacante y de los cuatro átomos adyacentes; las aplicaciones cuánticas pueden explotar su espín.

Por ejemplo, un láser puede excitar repetidamente un electrón en el centro N-V, que cada vez, al caer de nuevo a su estado no excitado, emitirá un solo fotón. Se ha utilizado el diamante así para realizar prototipos de criptografía cuántica que se basan en un suministro constante de fotones individuales.

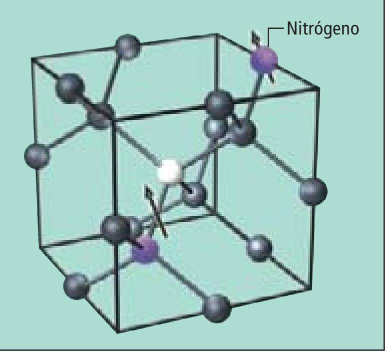






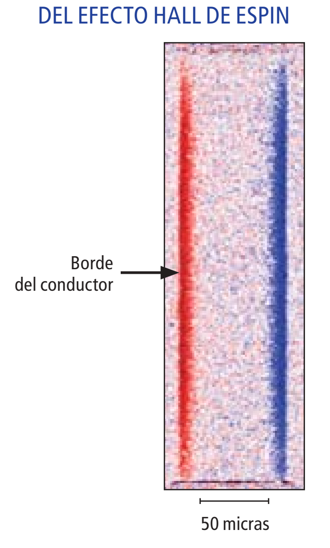
Los centros N-V del diamante aparecen como puntos brillantes (*rojos*) cuando se los bombea con un láser. Los centros cuyo espín se halla en el estado 1 brillan mucho más que los centros con espín en el estado 0. Ondas de radiofrecuencia sintonizadas a una determinada frecuencia cambian los centros N-V una y otra vez entre 0 y 1, pasando por estados de transición que son superposiciones cuánticas del 0 y del 1.

La inserción de un segundo átomo de nitrógeno cerca de un centro N-V proporciona un sistema de dos qubits acoplados que posibilita el procesado lógico. La frecuencia requerida para hacer saltar el qubit del centro N-V es ahora levemente más baja o más alta, de acuerdo con el estado del segundo nitrógeno. La aplicación de ondas a la frecuencia más alta puede hacer saltar el qubit del N-V solamente si el otro qubit es 1. A semejante operación se la conoce por puerta lógica NOT controlada, que permite computaciones cuánticas de cualquier tipo.



JEAN-FRANCOIS PODEVIN; DATOS DE DAVID D. AWSCHALOM

OBSERVACION EXPERIMENTAL DEL EFECTO HALL DE ESPIN



CIERTAS MEDICIONES realizadas en el año 2005 detectaron electrones con polarizaciones de espín opuestas (*rojo, azul*) que se acumulaban en los bordes de un conductor al que atravesaba una corriente.

CONTROL COLECTIVO DE ESPINES

Los dispositivos de la espintrónica sacan partido del espín, una característica de los electrones por la que vienen a ser unos minúsculos imanes de barra. Hay dos clases de dispositivos en cuestión: los que manipulan los espines de electrones uno a uno (*véase el texto principal*) y los que controlan grandes grupos de electrones de espín polarizado que fluyen por los semiconductores, las "corrientes de espín". A la vez que se trabaja en los dispositivos de electrones individuales, se están logrando resultados de valioso interés en el control de las corrientes de espín.

Tuve la fortuna de participar en estos avances durante mis estudios de doctorado, entre 2000 y 2005, integrado en el grupo de David D. Awschalom, de la Universidad de California en Santa Bárbara. Encontramos nuevas vías de generar y manipular la polarización del espín. También observamos por primera vez un fenómeno, el efecto Hall de espín, que puede proporcionar una manera de clasificar y encaminar electrones según la dirección de sus espines.

Puesto que los espines se comportan como minúsculos imanes, se los controla con campos magnéticos. Por lo usual, la producción de campos magnéticos requiere materiales magnéticos o imanes externos. En cambio, el recurso a campos eléctricos posibilitaría dispositivos espintrónicos más pequeños y rápidos, más fáciles de fabricar porque más fácil es confinar los campos eléctricos en pequeñas regiones así como producirlos de alta frecuencia (que permiten operaciones más rápidas). Desgraciadamente, los espines, como todos los imanes, no responden en circunstancias normales a los campos eléctricos.

Un efecto relativista viene en nuestra ayuda. Los electrones que se mueven perpendicularmente a un campo eléctrico "ven" un débil campo magnético mezclado con el eléctrico. Ese campo magnético condiciona el espín del electrón. Se trata de una interacción de "acoplamiento espín-órbita", así llamada porque se estudió primero en relación con los electrones que "orbitaban" en el campo eléctrico de los núcleos atómicos.

El grupo de Santa Bárbara investigó inicialmente este efecto en arseniuro de galio, un semiconductor de uso general en electrónica. Vimos que cuando movíamos paquetes de electrones con espín polarizado a través de este material, los espines rotaban como si estuvieran en un campo magnético. Ese campo magnético fantasma podría también alinear los espines de electrones sin polarizar.

El acoplamiento espín-órbita también da lugar al efecto Hall de espín, predicho en 1971 por Michel D'yakonov y Vladimir Perel, del Instituto Ioffe, en Leningrado. Recibe esa denominación por analogía con el efecto Hall (descubierto en 1879 por Edwin Hall), en el cual se acumulan cargas opuestas en cada lado de un material por el que fluya una corriente y esté sometido a un campo magnético (*superior derecha*). En el efecto Hall de espín, una pequeña polarización de espín se acumula en los bordes de un material que lleve corriente eléctrica

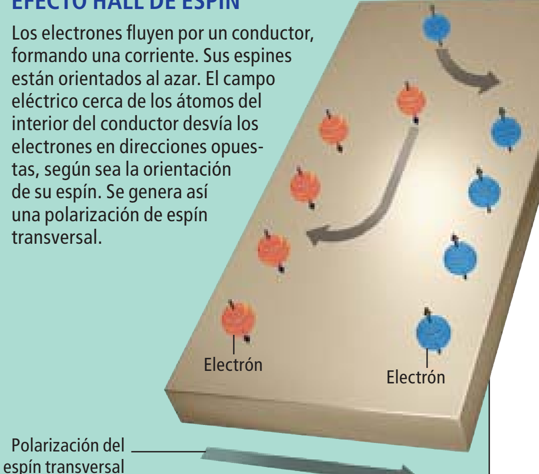
EFECTO HALL

Los electrones fluyen por un conductor, formando una corriente. Un campo magnético perpendicular desvía los electrones a un lado, en el que se acumulan. Los huecos (ausencias de electrones) se acumulan en el otro lado. De esta manera se genera un voltaje transversal.

Campo magnético
Electrón
Agujero
Conductor
Voltaje transversal

EFECTO HALL DE ESPIN

Los electrones fluyen por un conductor, formando una corriente. Sus espines están orientados al azar. El campo eléctrico cerca de los átomos del interior del conductor desvía los electrones en direcciones opuestas, según sea la orientación de su espín. Se genera así una polarización de espín transversal.



(*inferior derecha*), pero sin requerir un campo magnético. Este efecto sería otra manera, no magnética, de generar polarización de espín y de dirigir electrones según la orientación de su espín.

A finales de 2004, Roberto C. Myers (otro alumno de doctorado), Arturo C. Gossard, Awschalom y yo dimos a conocer que habíamos observado la esperada polarización de espín en los bordes de una tira de arseniuro de galio enfriado a 30 kelvin. Algunos meses más tarde, un grupo dirigido por Jörg Wunderlich, del Laboratorio de Hitachi en Cambridge, publicó observaciones del efecto Hall de espín relativas a huecos (ausencias de electrones). Hacia finales de 2006, el grupo de Awschalom logró el efecto Hall de espín a temperatura ambiente en un semiconductor de seleniuro de zinc. En conjunto, estos descubrimientos ofrecen diferentes posibilidades de desarrollar una técnica de semiconductores basada en el espín.

Yuichiro K. Kato es profesor asociado del Instituto de Innovación en Ingeniería de la Universidad de Tokio.

JEAN-FRANCOIS PODEVIN; DATOS DE DAVID D. AWSCHALOM

en medio del intervalo de banda, pero los átomos de impureza que se agregan al material intercalarán en dicho intervalo estados discretos, delgados peldaños adicionales de la escalera. El intervalo de banda del diamante es lo bastante grande para que dos de estos estados puedan diferenciarse en una energía del orden de la de un fotón de luz visible. Así, la luz de longitud de onda óptica puede excitar un electrón de un átomo de la impureza de un estado discreto a otro sin que tenga que dar todo el salto hasta la banda de conducción. Cuando el electrón cae nuevamente a su estado de energía más baja, emite un fotón con la frecuencia correspondiente a la diferencia de niveles energéticos; se trata del proceso conocido comúnmente como fluorescencia. Bajo una iluminación continua, el proceso óptico de excitación y relajación se repite una y otra vez; una impureza puede emitir millones de fotones por segundo. En 1997 un grupo dirigido por Jörg Wrachtrup, entonces en la Universidad Técnica de Chemnitz, detectó impurezas individuales en el diamante que despedían luz fluorescente de esa manera. El hallazgo puso en marcha múltiples investigaciones sobre la detección óptica de impurezas individuales.

La impureza que el grupo de Wrachtrup detectó en esos primeros experimentos consistía en un átomo de nitrógeno que ocupaba el lugar de un átomo de carbono y, en una posición adyacente, un vacío donde debería haber habido otro carbono: un "centro de nitrógeno y vacante (N-V)". Los centros N-V presentan en el diamante un conjunto de características notables que lo convierten en objeto preferido de investigación de muchos grupos en todo el mundo. El papel de la vacante es fundamental: el centro N-V difiere bastante de un átomo de nitrógeno sin vacante adyacente. Los electrones del centro N-V se mueven en órbitas que abarcan la vacante y sus tres carbonos vecinos, y sólo pasan una pequeña parte del tiempo cerca del nitrógeno. En razón de tales órbitas de tipo molecular, hemos de considerar el centro N-V como una única impureza, en vez de como un raro compuesto de átomo de nitrógeno y vacante.

Las impurezas individuales, así un centro N-V, emiten un fotón por vez. Esta característica es vital para el boyante campo de la criptografía cuántica [*véase* "Criptografía cuántica comercial", por Gary Stix; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2005]. Los sistemas de la criptografía cuántica transmiten información en forma de fotones individuales, cada uno de los cuales lleva un qubit. Las leyes de la física garantizan que un espía no podrá interceptar los fotones sin crear perturbaciones detectables por el receptor en los qubits. En 2002 Philippe Grangier y sus colaboradores, del Instituto de Optica de Orsay, presentaron el primer prototipo de sistema criptográfico cuántico basado en una fuente de fotones individuales. Un avance notable que pudo alcanzarse gracias a una fuente de fotones individuales sumamente estable y fiable: un centro N-V en diamante.

Los electrones de un centro N-V también tienen un estado de espín, que se puede polarizar como convenga con luz de longitud de onda óptica. Otros sistemas de espín en estado sólido deben enfriarse a muy bajas temperaturas para ser polarizados; el espín de un centro N-V, en cambio, pasa bajo iluminación óptica a otro estado de espín incluso a temperatura ambiente. Además, los experimentadores descubrieron que uno de los estados de espín brilla con mayor luminosidad que los otros. Así, la intensidad de la fluorescencia vale para leer el estado de espín: brillante para el estado "1," débil para el estado "0."

Los diamantes son para siempre

En fecha reciente, nuestro grupo de la Universidad de California en Santa Bárbara ha elaborado una técnica de imagen de un solo fotón para observar tales espines individuales y su orientación en la red del diamante, con el fin de manipularlos. Hemos estudiado la interacción entre espines individuales y entorno —en este caso el diamante que los rodea—, algo de fundamental importancia para desarrollar aplicaciones cuánticas. Las interacciones entre centros N-V y átomos próximos nos han permitido observar los "espines oscuros" del diamante, impurezas de nitrógeno sin una vacante asociada que, por sí mismas, son invisibles para la detección óptica.

La propiedad crucial, según lo observado en estos experimentos, es la extraordinaria estabilidad de los espines del diamante frente a las perturbaciones ambientales. Uno de los aspectos más apasionantes del centro N-V es que exhibe comportamiento cuántico, incluso a temperatura ambiente. Las excitaciones térmicas tienden a diluir los fenómenos cuánticos. Muchos fenómenos cuánticos del estado sólido requieren temperaturas bajísimas, lo que dificulta su estudio, por no hablar de darles usos prácticos.

Mas los espines en materiales sólidos sufren dos problemas. El primero es una interacción, el acoplamiento espín-órbita, en la que participan el espín del electrón y su movimiento orbital. El segundo, las interacciones magnéticas con otros espines, en especial los de los núcleos que forman la red. En el diamante, estos dos efectos son muy débiles. Por ejemplo, los núcleos de carbono 12, que forma el 99 por ciento del carbono natural, tienen

MULTIPLES FACETAS DEL DIAMANTE

El nombre "diamante" viene de la palabra griega antigua *adamas*, que quiere decir "invencible".

El diamante es el mineral natural más duro que se conoce. La sustancia más dura conocida es un agregado de nanotubos de diamante, 1,11 veces más duro que el diamante.

El diamante conduce el calor mejor que cualquier otro material sólido.

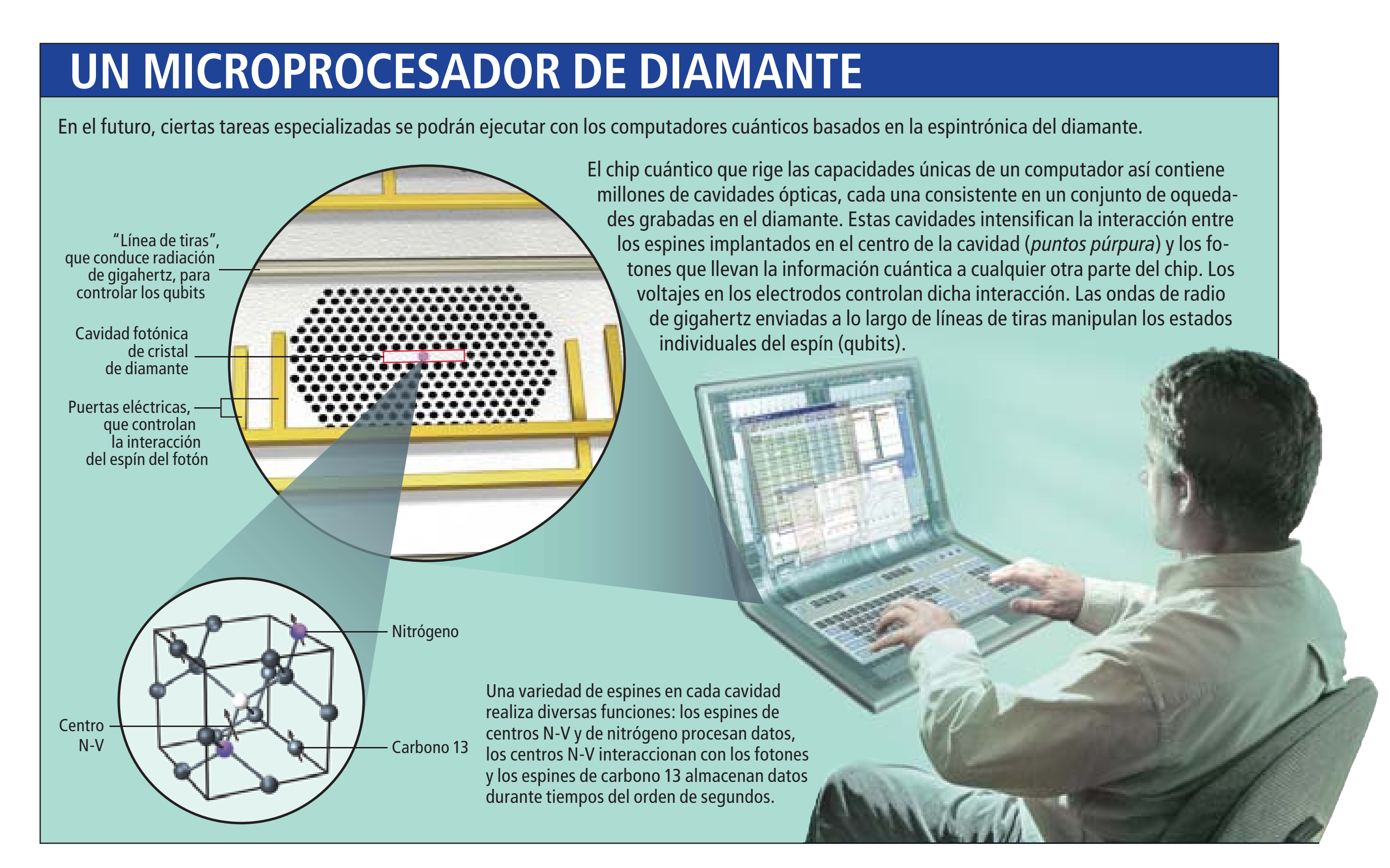
El diamante tiene un alto índice de refracción (2,4, por alrededor de 1,5 para el vidrio).

El diamante puro es un aislante eléctrico (bloquea todo flujo de corriente), pero cuando se dopa con impurezas puede convertirse en semiconductor.

Como el salto de energía entre los electrones ligados y los electrones de conducción es grande en el diamante semiconductor, este es transparente a la luz ultravioleta. Valdría por ello para detectores de ultravioleta y para diodos emisores de luz. En la electrónica de alta potencia halla otra aplicación.

Al permitir que las impurezas se exciten sin ionizarse, esa amplitud del salto de energía es una de las claves de la espintrónica cuántica.

Los estados cuánticos de espín de las impurezas del diamante pueden conservar su carácter cuántico durante un tiempo largo, alrededor de un milisegundo, incluso a temperatura ambiente.



espín cero; no producen, pues, ningún efecto en el espín de un centro N-V. Debido a que es tan inmune a perturbaciones exteriores de esta clase, el estado cuántico del espín de un centro N-V sirve para codificar información cuántica, incluso a temperatura ambiente. El prototipo criptográfico cuántico de Orsay antes mencionado opera a temperatura ambiente.

Por supuesto, "inmune" es un término relativo. La información cuántica almacenada en el estado de espín de un centro N-V en un diamante de gran pureza a temperatura ambiente se pierde en un milisegundo, más o menos. Esta pérdida equivale a que un bit se invierta en un computador normal. Como esos errores de los computadores ordinarios, los errores de los qubits se pueden corregir siempre que el ritmo de producción de errores sea lo bastante bajo. Existe una regla sencilla para la corrección de errores cuánticos: a lo más, pueda fallar una operación en 10.000. Una proporción mayor haría que el procedimiento se convirtiese en una batalla perdida: los propios datos y operaciones adicionales necesarios para realizar la corrección introducirían demasiados errores nuevos.

¿Qué tal cumple el centro N-V en diamante el criterio de 1 en 10.000? La radiación de radiofrecuencia dirigida al centro N-V a través de las guías de onda incorporadas al chip pueden efectuar cambios deliberados del espín del centro N-V en 10 nanosegundos. Durante la vida media, del orden del milisegundo, del estado cuántico del espín pueden ocurrir unas 100.000 operaciones de ese estilo. Así, el ritmo de error será, muy aproximadamente, de un fallo en 100.000 operaciones. Este ritmo está muy por debajo del umbral y, hasta la fecha, es mejor que el de cualquier otro sistema de qubits de estado sólido.

La criptografía cuántica requiere solamente una secuencia de qubits individuales. En cambio, para la computación cuántica los qubits deben interaccionar para producir nuevos qubits. Se trata de una operación análoga a las efectuadas por las puertas lógicas de los computadores comunes con los pares de bits que les llegan, de las que resulta un bit de salida. Por ejemplo, una puerta AND produce una salida 1 si ambas entradas son 1, y un 0 en los demás casos. Las puertas lógicas cuánticas deben hacer operaciones similares y, además, aceptar superposiciones cuánticas de bits como entradas y entregar superposiciones como salidas. El siguiente paso hacia el tratamiento de información cuántica con espines de impurezas consiste en controlar el acoplamiento entre dos espines de modo que ejecute una lógica cuántica.

Nuestro grupo y el de Wrachtrup han estudiado una interacción que podría efectuar lógica cuántica con dos espines que estén cerca uno

JEAN-FRANCOIS PODEVIN

Bibliografía complementaria

A Hall of Spin. Vanessa Sih, Yuichiro Kato y David D. Awschalom en *Physics World*, vol. 18, págs. 33–37; 2005.

Two Groups Observe the Spin Hall Effect in Semiconductors. Charles Day en *Physics Today*, vol. 58, Nº. 2, págs.17–19; febrero, 2005.

Challenges for Semiconductor Spintronics. David D. Awschalom y Michael E. Flatté en *Nature Physics*, vol. 3, págs. 153–159; 2007.

Spins in Few-Electron Quantum Dots. R. Hanson, L. P. Kouwenhoven, J. R. Petta, S. Tarucha y L. M. K. Vandersypen en *Reviews of Modern Physics* (*en prensa*).

del otro en la red del diamante. En concreto, hemos medido la interacción entre el espín de un centro N-V y un espín de una impureza de nitrógeno próxima (sin vacante). Se trata, en gran parte, de un acoplamiento dipolar magnético, en esencia igual a la fuerza por la que dos imanes de barra macroscópicos se alinean con los polos norte de cara a los polos sur.

La interacción procede como sigue. Los estados 0 y 1 de un centro N-V tienen energías algo diferentes; la diferencia es mucho menor que la energía de un fotón óptico. En cambio, las ondas de radio del orden del gigahertz sí llevarán los espines de un estado a otro, entre el 0 y el 1 y sus superposiciones. Cuando el centro N-V esté cerca de otro átomo de nitrógeno, la separación de sus estados 0 y 1 dependerá del estado de espín de ese otro nitrógeno. Esta dependencia posibilita una puerta controlada NOT (CNOT), en la que un qubit se invierte, si y solamente si el otro qubit es un 1. La puerta funcionará con ondas de radio sintonizadas a la frecuencia que invertirá el centro N-V, siempre que el espín del nitrógeno sea un 1. Si el espín del nitrógeno es un 0, la separación en energía del centro N-V será diferente y las ondas de radio no lo afectarán.

La puerta CNOT es bastante especial: podemos componer cualquier operación cuántica arbitraria en cualquier número de qubits combinando puertas CNOT que actúen en pares de qubits y rotaciones de qubits individuales (que también se realizan aplicando ondas de radio a los espines; sobre cada espín podría actuarse dirigiéndoles la radiación a lo largo de unos circuitos especiales, las "líneas de tiras"). La realización práctica de una puerta CNOT y de una rotación de qubit es, por lo tanto, un objetivo importante de la investigación.

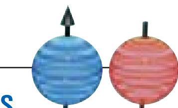
Podrían establecerse interacciones a larga distancia entre espines N-V en diamante con fotones como intermediarios. Dispositivos ópticos en un chip, por ejemplo guías de onda hechas del mismo sustrato de diamante, podrían dirigir los fotones. Integrando los centros N-V en cierto tipo de estructuras, las cavidades ópticas, en las que la luz forma ondas estacionarias, se intensificaría la interacción entre los espines y los fotones. En Santa Bárbara, con la colaboración de Evelyn Hu y sus alumnos, hemos llevado a cabo una demostración de que el principio de las cavidades de cristal fotónicas es factible. Cada "cavidad óptica" consiste en una región de diamante que lleva grabado un panal de agujeros. Los agujeros confinan y amplifican la luz en el centro de la estructura [*véase* "Cristales fotónicos", por Eli Yablonovitch; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2002]. Hasta el momento, sin embargo, este trabajo es muy preliminar: los centros N-V, que se distribuyen aleatoriamente en el diamante en lugar de estar colocados con exactitud en las cavidades, hacen de meros espectadores en nuestros estudios.

Introducir impurezas

Muchos de los experimentos con centros N-V realizados hasta la fecha han usado diamantes sintéticos. Es el caso de nuestras cavidades ópticas: los centros N-V se formaron naturalmente, aunque en localizaciones aleatorias, durante el proceso de crecimiento del diamante. Los investigadores de la Universidad Nacional Australiana, la Universidad de Bochum y el Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley están progresando mucho en la colocación de impurezas individuales en localizaciones específicas. Utilizan técnicas avanzadas de implantación iónica para insertar iones individuales de nitrógeno con precisión submicrométrica. Al calentar el diamante a 850 grados centígrados, las vacantes del diamante emigran. Cuando una vacante encuentra un átomo de nitrógeno, permanece en su vecindad: se forma un centro N-V.

Los centros N-V parecen una técnica prometedora de procesado de la información cuántica. Pero, ¿qué pasa con el almacenaje durante tiempos mayores que el milisegundo que tardan en desintegrarse los estados electrónicos de espín? El grupo de Mikhail Lukin, de la Universidad de Harvard, explora la utilización de los espines de los núcleos de carbono. Como el núcleo del isótopo más común del carbono, el carbono 12, tiene espín total cero, el grupo trabaja con átomos de carbono 13, cuyos núcleos tienen el espín de su neutrón adicional. Se transfiere la información codificada en un determinado espín de un centro N-V a un espín nuclear de carbono 13 individual y se recupera 20 milisegundos más tarde. El espín nuclear no muestra ningún signo de desintegración, señal de que el estado cuántico podría sobrevivir durante segundos. Así, los espines nucleares parecen una ruta propicia para el almacenaje de qubits. Basándose en estos estudios, los investigadores de Harvard han propuesto también un diseño de repetidor cuántico. Los repetidores cuánticos son un elemento necesario para la comunicación cuántica (la transmisión de qubits a largas distancias.)

Es un momento emocionante en la investigación de la información cuántica, con muchas arquitecturas computacionales compitiendo por la supremacía. En vista de los éxitos en los últimos años de la investigación basada en el espín del diamante, y con empresas de la magnitud de Hewlett-Packard entrando en el juego, los procesadores de información cuánticos a temperatura ambiente ya no parecen tan quiméricos.



Los autores

David D. Awschalom, Ryan Epstein y **Ronald Hanson** están asociados al Centro para Espintrónica y Computación Cuántica en la Universidad de California en Santa Bárbara. Awschalom es director del centro y profesor de física y de ingeniería eléctrica y computacional en Santa Bárbara. Su grupo de investigación se dedica a la dinámica del espín del electrón en sistemas semiconductores. Epstein obtuvo su doctorado en el grupo de Awschalom; estudió los centros de nitrógeno y vacante en diamante. Ahora realiza en el Instituto Nacional de Estándares y Técnica en Boulder, investigaciones posdoctorales sobre iones atrapados. Hanson fue investigador posdoctoral en el grupo y acaba de convertirse en profesor de física del Instituto Kauli de Nanociencia, en Delft. Para su doctorado en la Universidad Técnica de Delft, estudió los espines de electrones individuales en puntos cuánticos en arseniuro de galio.

NAVEGACION ANIMAL

Mediante un reloj biológico endógeno y la información sensorial procedente del eje terrestre, el Sol y las estrellas, el cerebro construye mapas cognitivos que guían el desplazamiento estacional de los animales migratorios

María Luisa Fanjul de Moles y Aldi de Oyarzábal

Como es bien sabido, la traslación de la Tierra, la inclinación del eje terrestre y las estaciones del año resultantes producen variaciones rítmicas en la conducta animal. Esos cambios afectan, en numerosas ocasiones, a la reproducción y, por tanto, a la perpetuación de la especie. Uno de los fenómenos rítmicos más sorprendentes y espectaculares —desconocido hasta hace algunos años— es el de la navegación animal. En primavera y en otoño, las especies migratorias viajan hacia una meta remota y definida.

Se cuentan por millones los animales que, siempre en la misma época del año, viajan a través de nuestro planeta. El caribú en los bosques canadienses, el ñu y otros mamíferos en las sabanas africanas, los sapos y tritones en los cursos de agua, las ballenas, salmones y langostas en los mares y miríadas de aves e insectos en el aire. Todos navegan largas distancias; siguen el mismo recorrido, año tras año, a lo largo de cientos y miles de kilómetros.

La orientación animal ha fascinado desde siempre a los naturalistas, pero este fenómeno ha merecido el interés de la ciencia formal desde hace escasos decenios.

Bases genéticas

La orientación a distancia plantea varias cuestiones. ¿Cómo conocen los animales migratorios el destino de su viaje y, por tanto, la dirección del trayecto? ¿Cómo establecen esa dirección? ¿Cómo la ajustan y mantienen? Y, sobre todo, ¿cómo saben que es el momento de cambiar de país o de continente?

Las aves migran hacia una meta definida; poseen información genética que favorece el desarrollo de tal capacidad. Se ha comprobado que los juveniles descendientes de individuos migratorios en cautiverio presentan de forma espontánea, al llegar a la estación apropiada, un estado de "inquietud premigratoria" característico: incluso en ausencia de sus mayores, se alinean hacia la dirección de la meta esperada.

De ciertos experimentos llevados a cabo con la mariposa monarca y otros insectos migratorios se desprende que entre los genes responsables del comportamiento migratorio se encuentran los "genes reloj". Esos genes, que se han mantenido en el curso de la evolución, son los responsables del sentido temporal de los animales.

Existen también otros genes, quizá no tan bien conservados, que determinan la dirección (vector direccional) de la ruta y el destino migratorio de las diversas poblaciones de una misma especie. Cuando las poblaciones intercambian información génica mediante la reproducción, puede cambiar la orientación de la ruta. En otras palabras, la hibridación confiere plasticidad a las rutas migratorias de una misma especie. Así sucede en la curruca capirotada (*Sylvia atricapilla*). El ave, que medra en el norte del continente europeo (sobre todo, en Alemania y países escandinavos), se inquieta llegado el otoño. Escoge entonces una de tres rutas migratorias para pasar el invierno: una parte de la población se dirige a las Islas Británicas; otra viaja hasta el norte de Africa, a través de España; un tercer grupo parte de Austria y migra hacia el sudeste, hacia Turquía e Israel, para recalar en Etiopía y Kenia.

En un experimento con currucas en cautiverio, se crearon híbridos de poblaciones procedentes de Alemania y Austria. Se observó

CONCEPTOS BASICOS

- En primavera y en otoño, las especies migratorias viajan hacia una meta remota y definida.
- Para emigrar a través del globo las aves y otros animales utilizan información procedente del Sol, la Luna y las estrellas, así como del campo magnético terrestre.
- Se sirven también de sensores internos que controlan su postura y movimiento, amén de un reloj biológico endógeno que sincronizan con el solar.



1. PARA MIGRAR A TRAVES DEL GLOBO TERRAQUEO las aves y otros animales utilizan información procedente del Sol, la Luna y las estrellas, así como de los campos geomagnéticos. La orientación solar resulta fundamental para adecuar sus funciones a los cambios estacionales anuales. La adecuación se basa en un programa cronométrico endógeno que se adapta a los cambios del azimut solar. El hombre, no obstante poseer relojes endógenos, ha creado cronómetros, sextantes, satélites y otros instrumentos externos para calcular con precisión su posición en el planeta. Así independizado de los cambios estacionales, puede viajar en cualquier momento.

ALDI DE OYARZABAL

que el vector direccional que determinaba la migración de los polluelos tomaba un valor intermedio entre el sudoeste y el sudeste. Ello demostró que los genotipos de la población alemana y la austriaca eran distintos. Así mismo, se comprobó que los rasgos génicos afectaban a la orientación migratoria de ambas poblaciones a través de la elección del vector direccional.

Orientación

La elección de una ruta determina la orientación del cuerpo y la dirección del desplazamiento. Estos dos aspectos de la locomoción varían de forma independiente. Hallamos un claro ejemplo de ello en algunos crustáceos. Los cangrejos muestran dos tipos de alineamiento corporal: en algunas especies, cuando la dirección del desplazamiento cambia, el cuerpo modifica su orientación para alinearse con la trayectoria; en otras, cambia sólo la dirección de las patas ambulatorias, mientras el cuerpo mantiene la orientación inicial. Los cambios en la trayectoria que van acompañados de un alineamiento constante (entre el cuerpo y la dirección del desplazamiento) pueden estar orientados por el Sol u otros estímulos externos. Aunque la posición del astro cambia, los ojos del observador registran siempre la misma dirección de estímulo. Ello se debe a que la información solar no es la única que recibe el animal para llevar a cabo la locomoción direccional.

El ángulo del cuerpo del animal respecto de la señal de referencia se determina a partir de dos informaciones sensoriales: el ángulo del cuerpo respecto del Sol y el ángulo del cuerpo respecto a la dirección del movimiento. Esta última información, de naturaleza interna, proviene de las órdenes motoras que controlan el movimiento de las patas. Existen dos respuestas motoras, una que ajusta la orientación del cuerpo en relación con la dirección de la marcha y otra que ajusta la dirección de la marcha en relación con el Sol.

Una vez alineado, el animal se hallará listo para partir. Sin embargo, deberá determinar la distancia a la que se encuentra su meta; tarea nada fácil, sobre todo si el destino se encuentra lejos. Los propios humanos, cuando deseamos viajar a un destino remoto y desconocido, nos valemos de instrumentos de precisión para no perdernos. En el curso de la historia, los navegantes que han cruzado los mares para describir nuevos continentes han utilizado brújulas, sextantes, compases magnéticos y otros instrumentos.

Para conocer su posición en el océano, los marinos de antaño se servían de sextantes y cartas náuticas; mediante compases y brújulas calculaban la trayectoria. A partir de esos datos, y conociendo la velocidad y el tiempo transcurri-

do desde la salida, determinaban la dirección y estimaban el tiempo de llegada a puerto.

Gracias a las teorías de Einstein y al desarrollo de la física moderna, esa información se obtiene hoy con facilidad mediante los sistemas GPS [*véase* "Nuestro Einstein cotidiano", por Philip Yam, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre, 2005]. Los pilotos aéreos del siglo XXI se orientan mediante la información que les proporcionan los satélites artificiales; calculan la velocidad, la trayectoria y la posición a partir de los cambios en la aceleración que registran los sistemas giroscópicos inerciales. Toda esa información se plasma en los cuadernos de bitácora.

Un animal viajero no requiere de esos artefactos. A partir de la información que proporciona la propia locomoción, el sistema nervioso determina la velocidad y el tiempo, y estima así la distancia del trayecto, en analogía con los instrumentos de factura humana. De ese modo se orientan las hormigas, las abejas y otros insectos. Las hormigas del desierto (*Cataglyphis fortis*) determinan la duración de su desplazamiento; la abeja de la India (*Apis dorsala*) calcula la fuerza con la que se desplaza. A partir de esas variables, ambas especies estiman la distancia recorrida.

Relojes y brújulas biológicas

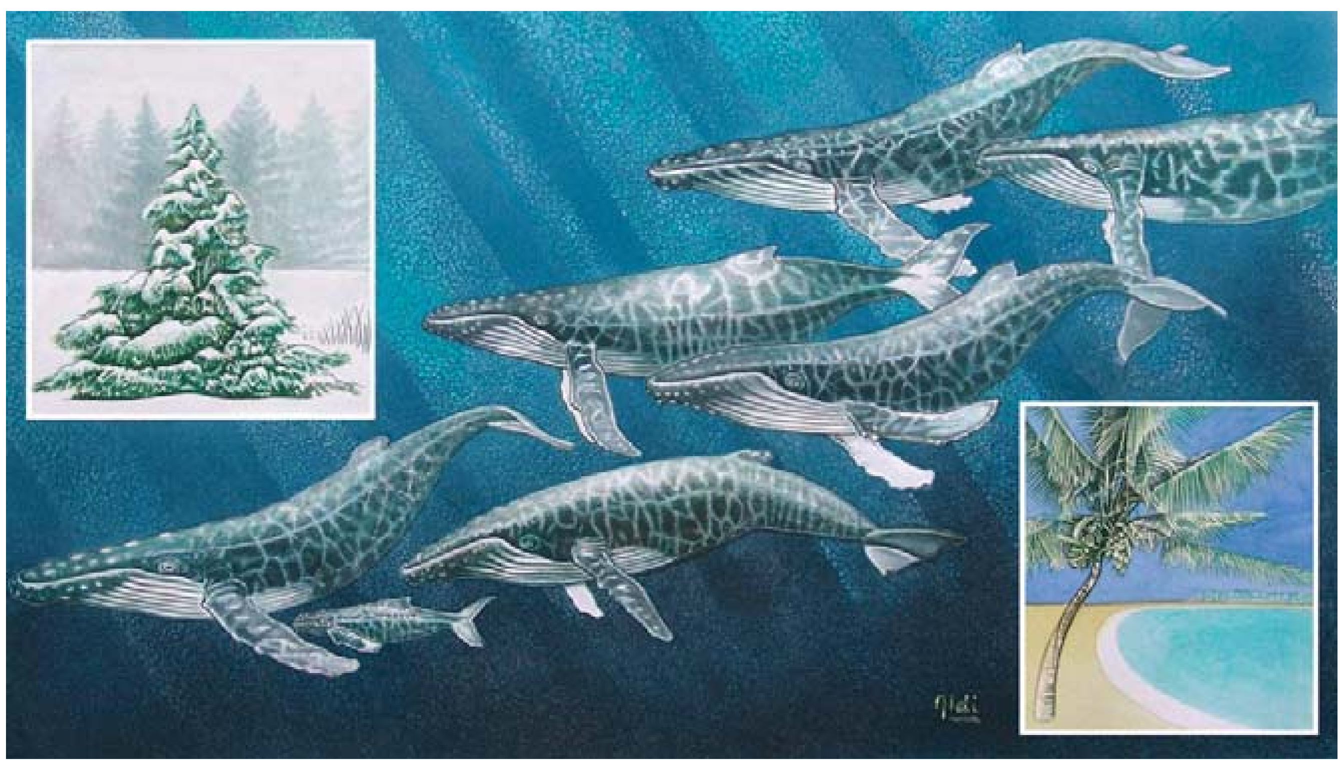
Numerosos animales poseen la capacidad de construir mapas sensoriales, de mayor o menor complejidad, que les ayudan a orientarse. Se ha demostrado que las aves poseen mapas cognitivos basados en un sistema de coordenadas análogo al sistema de longitud-latitud de la navegación humana. La latitud se determina a partir de la posición y la altura de las estrellas o mediante la inclinación del campo magnético.

La longitud es más difícil de conocer. Entre dos puntos terrestres con la misma latitud existe una diferencia de tiempo en la salida de los astros debida a la diferencia de longitudes. Ello ocasiona un error en la estimación del tiempo recorrido, variable que se utiliza para calcular la posición en relación con la distancia recorrida.

La falta de un criterio seguro para determinar la longitud constituyó un grave problema para navegantes y exploradores humanos hasta el siglo XVIII. Convocado un premio, lo ganó John Harrison con su cronómetro, un reloj de alta precisión que compensaba la diferencia entre el tiempo local y el longitudinal. Desde entonces, los navegantes calculan la longitud mediante cronómetros de alta precisión.

También los animales utilizan una suerte de cronómetros biológicos para compensar los cambios longitudinales en la posición de los astros. Asimismo, cuentan con un compás biológico que usan para determinar, a partir de señales internas y externas, la dirección de su propio desplazamiento.

Un compás de orientación corresponde a un instrumento mediante el cual se mide una dirección con respecto a una referencia espacial. Por botón de muestra: un compás



2. LA BALLENA (*Megaptera novaeangliae*) y otros mamíferos marinos utilizan la información magnética de la Tierra para orientar su natación. Cada año se desplazan desde las regiones árticas a las tropicales para la reproducción y la cría. En los meses fríos migran hacia México y Hawai; regresan a Canadá en primavera y verano.

ALDI DE OYARZABAL

magnético determina la dirección con respecto al eje magnético de la Tierra, mientras que una brújula nos da la dirección con respecto a un punto cardinal. En términos generales, pues, se puede obtener información direccional a partir de referencias que permitan trazar un sistema de coordenadas en el que un ángulo defina un vector direccional. Así, un compás biológico corresponde al “mecanismo” que utilizan los animales para estimar ese vector direccional.

Los animales se sirven de sensores o receptores internos, sensibles a los cambios de posición, para detectar la velocidad y las aceleraciones (linear y angular) producidas por la postura y el movimiento. Hallamos un ejemplo de ese tipo de sensores en el aparato vestibular de los vertebrados y los estatolitos y estatocistos de los invertebrados. Existen otros sensores, que detectan los cambios ambientales a partir de la posición de los astros, el eje terrestre y otras señales externas. Las señales sensoriales envían al sistema nervioso central (SNC) una información similar a la que los humanos obtienen de los sistemas GPS. Mediante este refinado sistema de cómputo, “calculan” todas las variables necesarias para emprender un viaje sin contratiempos.

Referencias terrestres

La brújula magnética constituye uno de los descubrimientos más importantes del ser humano; determina, de forma sencilla, la dirección del eje terrestre. El campo magnético de la Tierra provee una referencia espacial permanente que guía el desplazamiento direccional; numerosos animales migratorios lo detectan y utilizan para orientarse.

La sensibilidad magnética varía de una especie a otra. Parece ser que casi todos los animales poseen cierta capacidad de adaptación y de aprendizaje magnéticos. Se ha propuesto que algunas aves migratorias, como las paseriformes, aplican esa información para escoger las constelaciones celestes que les orientan en el cielo nocturno. Aunque no se trata de la única brújula biológica, sí constituye una de las más extendidas.

Por manipulación de las componentes horizontal y vertical de campos magnéticos artificiales se ha comprobado que las aves migratorias no distinguen la polaridad norte-sur de un campo magnético. En cambio, sí determinan, a partir del ángulo de inclinación del campo, la dirección norte; es decir, a partir de la componente horizontal del campo (que les proporciona sólo una referencia norte-sur) definen una dirección vertical hacia el norte.

Los datos también experimentales indican que las aves paseriformes utilizan el campo magnético para orientarse. Se ha demostrado, en experimentos de radar, que cuando las golondrinas o los estorninos atraviesan cielos nublados, mantienen la orientación merced al vector magnético terrestre. Las palomas mensajeras se sirven de ese vector para regresar a casa; también guía la migración de la gaviota (*Larus delawarensis*).

Las brújulas biológicas encuentran otras referencias en el movimiento que producen el viento, el agua y demás fenómenos ambientales. En particular, la dirección del viento. Las aves nocturnas viajeras como el gavilán (*Accipiter brevipes*), privadas de información celeste, vuelan hacia el gradiente eólico.

Algunas corrientes oceánicas son bastante constantes y predecibles. Así, numerosos peces, tortugas y mamíferos marinos detectan la dirección de flujo oceánico mediante los cambios que induce el campo magnético terrestre. Utilizan, asimismo, la energía mecánica que genera su movimiento por el fondo del océano (fricción contra el suelo, cambios en la posición del cuerpo y de las extremidades, etcétera). Otra fuente de información mecánica externa es la que ofrece el oleaje al generar corrientes alternativas. Las langostas (*Palinurus argus*) y otros crustáceos detectan esos cambios; los emplean, a modo de brújula, para orientarse en su migración estacional.

Referencias celestes

Una pulga acuática salta escasos metros de la playa a la línea de mar. Una abeja vuela varios cientos de metros para alimentarse. La mariposa monarca, lo mismo que numerosos insectos, migra miles de kilómetros hasta su refugio invernal. Todas esas especies utilizan una brújula solar para encauzar la trayectoria



3. MARIPOSA MONARCA (*Danaeus plexippus*) en su refugio invernal de los bosques de Oyamel. Perchea en una *Asclepia*, género que se encuentra en las regiones montañosas del centro de México.

CORTESIA DE PETER J. BRYANT, UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA



4. LA GAVIOTA ARTICA (*Larus glaucescens*) en vuelo migratorio.

de su viaje. Otras brújulas celestes son las estrellas y la luna.

Los primeros estudios sobre la brújula estelar se realizaron con palomas en cautiverio, instaladas en cielo abierto o en un planetario artificial. Se demostró que las aves se orientaban sólo cuando el cielo estaba limpio de nubes y se veían las estrellas. Ahora sabemos que las aves reconocen la configuración de los astros con independencia de la posición (absoluta) de éstos en el cielo, de forma similar a como nosotros, los humanos, localizamos la estrella polar en la Osa Mayor.

En la orientación estelar parece operar un factor de aprendizaje que guarda relación con el compás magnético. Algunas aves migratorias expuestas a patrones de estrellas, en ausencia del compás magnético no muestran alineamiento ni dirección; al someterlas a un campo magnético, en cambio, se alinean correctamente hacia la meta. Algunos autores proponen que el vector direccional basado en la forma de las constelaciones no es innato, sino aprendido, en tanto que sí sería congénita la aplicación de la brújula magnética.

La orientación a través de la brújula solar se descubrió de forma simultánea en aves y abejas. En experimentos ya clásicos, Karl von Frish encontró que las abejas utilizaban referencias visuales, fundamentales para determinar la dirección de su trayectoria, que dependían de la posición del Sol; por ejemplo, la luz polarizada. Un cielo nublado ejerce un efecto supresor en el vuelo migratorio de palomas y mariposas; retrasa su regreso a casa. Ese tipo de observaciones avalaban la hipótesis de que el astro constituía una pieza clave en la navegación animal.

En las zonas templadas del hemisferio norte, el Sol suele encontrarse al sur del observador. El Sol sirve, pues de brújula si un animal se orienta hacia él e ignora que la dirección del astro cambia. Algunas mariposas vuelan hacia el Sol en otoño en busca de climas cálidos y lo dejan atrás en primavera para volar hacia el norte y regresar a casa. Cuando el Sol no se distingue con nitidez, su posición se infiere de los patrones de intensidad, color o polarización de la luz del firmamento.

Numerosos artrópodos utilizan la polarización de la luz para guiar su desplazamiento. Los mosquitos, las abejas y otros insectos voladores se apoyan en la polarización de la luz celeste para orientarse; detienen el vuelo, si les falta esa información por la presencia de nubes o por la posición del Sol.

Dos variables definen la posición del Sol respecto a la Tierra: la altura sobre el horizonte y el azimut. La altura corresponde a la componente vertical; es nula al amanecer y máxima al mediodía. El azimut corresponde a la componente horizontal; es el ángulo tendido con el meridiano por el círculo vertical que pasa por un punto de la esfera celeste (la posición del Sol en este caso). El azimut define la trayectoria del Sol proyectada en el horizonte; determina la dirección de la brújula solar.

Aunque el Sol se mueve de forma constante (alrededor de 15º por hora), la velocidad del azimut no es uniforme a lo largo del horizonte; cambia presto cuando el Sol se halla en su cenit (intersección de la vertical con la esfera celeste, por encima de la cabeza del observador) y, de forma lenta, cuando está en el nadir (punto de la esfera celeste diametralmente opuesto al cenit). La trayectoria aparente del Sol a través del cielo es una función compleja que depende de la latitud del observador y la estación del año. En los polos, la velocidad del azimut viene a ser igual a la velocidad de rotación de la Tierra (360º en 24 horas o 15º por hora); en el ecuador, la trayectoria solar se torna inclinada y la velocidad disminuye.

El azimut cambia también durante el día: es horizontal durante mañana y tarde pero vertical al mediodía. Dado que la posición del Sol en la bóveda celeste depende de la latitud geográfica, cuando un animal migratorio se mueve de norte a sur, el arco solar que al principio de su migración estaba inclinado hacia el sur se va haciendo cada vez más vertical hacia el ecuador, inclinándose cada vez más hacia el norte en el hemisferio sur.

Apenas comenzamos a entender el modo en que los animales compensan esos cambios. Parece que la compensación se lleva a cabo mediante mecanismos que modifican la dirección de la trayectoria del animal con respecto al Sol. Por ejemplo, si un animal vuela hacia el este, durante la mañana se dirigirá hacia el Sol, conforme avance el día se desviará hacia el lado, de suerte que al mediodía volará en dirección perpendicular al astro y por la

Los autores

María Luisa Fanjul de Moles y **Aldi de Oyarzábal** son profesores de la facultad de ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. Fanjul de Moles es catedrática de fisiología animal. Se dedica a la neurofisiología y al estudio de los biorritmos. Coordina el laboratorio de neurofisiología comparada de la facultad de ciencias de la UNAM. Aldi de Oyarzábal es biólogo. Posee una maestría en ilustración de la historia natural del Colegio Real de Arte de Londres.

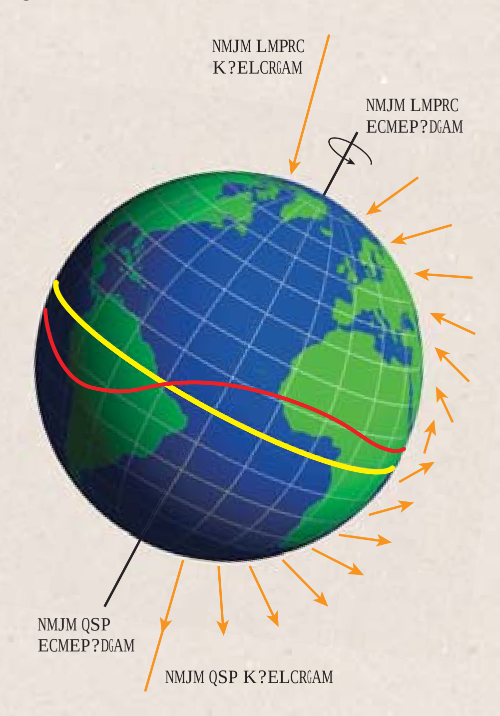
ASI SE ORIENTAN LOS ANIMALES

Para emigrar a través del globo terráqueo las aves y otros animales utilizan información procedente del Sol, la Luna y las estrellas (brújulas celestes), así como de los campos geomagnéticos (brújula magnética).

BRUJULA MAGNETICA

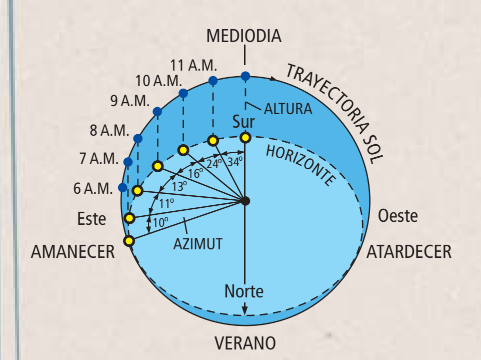
El campo magnético terrestre (*flechas naranjas*) varía en intensidad y dirección. Horizontal en el ecuador magnético (*línea roja*), se va inclinando hasta los 90 grados en el polo norte magnético y hasta –90 grados en el polo sur magnético. La intensidad (indicada por la longitud de las flechas) es máxima cerca de los polos magnéticos y mínima en el ecuador magnético.

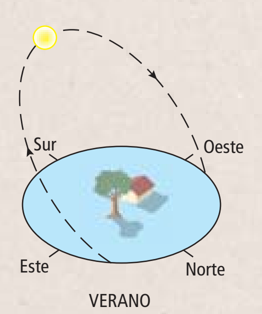
El vector magnético terrestre provee una referencia espacial permanente. Numerosos animales lo detectan y utilizan para orientarse y guiar su desplazamiento. Cuando las golondrinas o los estorninos atraviesan cielos nublados, mantienen la orientación merced a ese vector. Las palomas mensajeras se sirven del mismo para regresar a casa. También guía la emigración de las gaviotas.

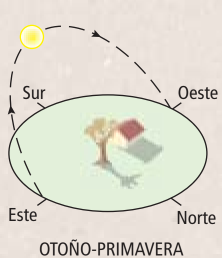


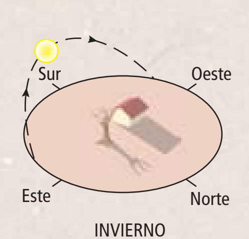
BRUJULA SOLAR

Numerosos insectos y aves orientan su desplazamiento a partir de la posición del Sol (cuando el astro no se distingue con nitidez, ésta se infiere de los patrones de intensidad, color o polarización de la luz del firmamento). Dos variables definen la posición del Sol respecto a la Tierra: la altura sobre el horizonte y el azimut. La altura es la componente vertical, nula al amanecer y máxima al mediodía. El azimut, la componente horizontal, define la trayectoria del Sol proyectada en el horizonte; determina la dirección de la brújula solar.









SINCRONIZACION DE RELOJES

La brújula solar animal responde en mayor medida al azimut y en menor, a la altura del astro. Pero la velocidad del azimut no es uniforme a lo largo del horizonte; varía en función del momento del día, de la latitud y de la estación del año. Para compensar esos cambios azimutales, los animales cuentan con un programa temporal endógeno o reloj biológico. Sincronizan su reloj (interno) con el solar (externo), mediante la información que proporcionan los ciclos ambientales asociados a la rotación o a la traslación terrestre (el ciclo diario de luz-oscuridad, por ejemplo). Adecuan así las funciones del organismo a los cambios rítmicos del medio.

noche lo dejará atrás. ¿A qué mecanismos de compensación nos referimos?

Se ha demostrado que la orientación solar de numerosos animales se basa en un programa temporal endógeno, adaptado a los cambios en el azimut. Se trata de relojes biológicos similares a los cronómetros antes mencionados que utilizaban los marinos.

Esos relojes constituyen verdaderos dispositivos fisiológicos. Su localización anatómica se conoce en algunas especies; así, el núcleo supraquiasmático en los mamíferos. Generan y regulan el ritmo de varios procesos fisiológicos y conductuales. Tales relojes, los ritmos circadianos, se hallan determinados genéticamente y oscilan con un período independiente, aunque cercano al de las variaciones cíclicas ambientales de 24 horas asociadas a la rotación de la Tierra.

Puesto que el período de ese reloj interno no coincide con el solar, externo, el animal debe obtener información de los ciclos ambientales asociados a la rotación o a la traslación terrestre para adecuar las funciones del organismo a los cambios rítmicos del medio. Esos "dadores de tiempo" (*zeitgeber*) envían la información sensorial cíclica al reloj biológico, que sincroniza el período interno con el del día astronómico; adecua las funciones cíclicas internas al tiempo externo.

El ciclo diario de luz-oscuridad es el que sincroniza el reloj biológico con el reloj solar. Cuando el reloj biológico recibe la información del tiempo local mediante las señales provenientes del período de luz-oscuridad, cambia su velocidad de oscilación: se adelanta o atrasa para ponerse en fase, sincronizarse con el tiempo externo.

Se han ideado experimentos muy diversos para demostrar el papel determinante del reloj biológico en el impulso migratorio. Klaus Hoffman realizó uno de los ensayos clásicos. Comprobó que el estornino, un ave que migra hacia el este, cambiaba el vector direccional al sincronizarse con ciclos de luz-oscuridad en los que el período luminoso comenzaba seis horas después del ciclo luminoso normal (la luz se encendía al mediodía y se apagaba a la medianoche). Una vez sincronizadas con el tiempo local, las aves cambiaban su dirección de búsqueda hacia el oeste: se encaminaban hacia el Sol al mediodía, mientras que en condiciones normales se hubieran dirigido a 90º a la izquierda del astro. El experimento reveló que el estornino ajustaba la brújula direccional de acuerdo con su tiempo interno. Es decir, el reloj circadiano del animal se adaptaba al movimiento azimutal del Sol.

Existe otro programa endógeno, el reloj circanual, que se ajusta a los cambios azimutales derivados del movimiento de traslación. Este mecanismo circanual persiste, al igual que el circadiano, en condiciones experimentales controladas. Modifica el tiempo, la dirección y la distancia de la migración de las aves, a partir de la información del azimut solar y mediante la generación de señales cíclicas hormonales. Por botón de muestra, la secreción de melatonina parece sincronizar con los cambios ambientales la conducta sexual y migratoria de los animales.

La mariposa monarca (*Danaeus plexippus*) viaja 3600 kilómetros desde su hábitat canadiense para llegar al refugio invernal en los bosques de Oyamel, en la región central de la república mexicana. Sabíamos que este lepidóptero encuentra su ruta mediante una brújula solar, pero hasta 2004 no entendimos la forma en que la brújula en cuestión interactuaba con el reloj circadiano del animal para compensar el movimiento aparente del Sol. Merced a esta compensación de las desviaciones del azimut solar durante los cambios cíclicos diarios y estacionales, la mariposa mantiene el vuelo hacia el suroeste.

Mediante un simulador de vuelo y un ingenioso diseño experimental se demostró la relación entre la brújula solar y el reloj bioló-



5. EL CANGREJO DE RIO *Procambarus clarkii* es una especie originaria del sureste de los EE.UU. que se ha extendido hacia otras regiones y continentes. Aunque es capaz de migrar, su amplia distribución geográfica se debe a la introducción del hombre; a menudo se considera una plaga. En 1973 se introdujo en España, donde ha invadido numerosos ecosistemas acuáticos.

IBEN HOVE SØRENSEN/AUDOUIN BIRDING TOURS



6. CUERVOS MARINOS (*Phalacrocorax carbo sinensis*) en la costa danesa. El cormorán migra desde las costas de Dinamarca hacia el suroeste de Europa central para invernar en regiones del oeste y centro del mediterráneo.

CRISTIAN JENSEN MARCET/AUDOUIN BIRDING TOURS

gico del lepidóptero. Las condiciones de luminosidad que alteran el reloj circadiano a escala molecular y conductual inactivan el funcionamiento de la brújula y, con ello, modifican la ruta migratoria del animal. Los trabajos de Barrie Frost y Steven Reppert, de la Universidad de Massachusetts, nos aclaran qué parámetros lumínicos ofrecen información clave para la operación de la brújula solar: la luz ultravioleta y el ángulo de polarización de la luz. Merced a esta "guía lumínica", nuestro huésped invernal navega incluso en días nublados, sin necesidad de recurrir a un vector magnético.

La navegación constituye un proceso de naturaleza adaptativa. Centrémonos, pues, en la presión selectiva que llevó al hombre a fabricar los instrumentos que le guían por mares y cielos. Los nativos de las islas del Pacífico, que no poseen instrumentos refinados, viajan de una isla a otra guiándose por "senderos estelares": sucesiones de estrellas que aparecen y desaparecen en el cielo, manteniendo la misma dirección día tras día, merced a la rotación de la Tierra. Algunos isleños utilizan una auténtica brújula estelar. Determinan la dirección de su rumbo a partir del ascenso y descenso de 13 estrellas más la posición estacionaria de la estrella Polar y la Cruz del Sur. Aunque la dirección de la navegación se define mediante el azimut de las estrellas "móviles", los cielos nublados exigen el conocimiento preciso de la relación interestelar. Los polinesios le han dado nombre a más de 200 estrellas; reconocen muchas más por asociación a ésas.

Nuestro sentido de orientación se halla, en efecto, estrechamente ligado a la memoria y al aprendizaje. Construimos mapas mentales a partir de los elementos del paisaje que proveen la información sensorial necesaria para desplazarse en el espacio. Tales mapas debieron de resultar fundamentales para nuestros antepasados cazadores y recolectores, que recorrían largas distancias en busca de alimento y regresaban, así orientados, a su refugio.

Tras esa cartografía cognitiva se esconde la plasticidad del sistema nervioso central y su capacidad de filtrar la información sensorial de mayor importancia para la supervivencia, a saber, la visual y la olfativa. El desarrollo de las neurociencias y diversas técnicas de formación de imágenes combinadas con experimentos de navegación por paisajes virtuales han revelado paralelismos entre las bases neurales de la navegación humana y la animal. En otras especies de vertebrados y en el hombre, la estructura cerebral responsable de la memoria espacial, el hipocampo, resulta esencial para la navegación de un sitio a otro.

El núcleo supraquiasmático del hipotálamo en los mamíferos y la glándula pineal en las aves generan los mecanismos rítmicos que sincronizan el reloj biológico con los cambios anuales en la duración del día; ello facilita la estimación del inicio y la duración de la navegación. Sin duda, la presión selectiva del medio debió de modular el cerebro de los animales para el desarrollo de sus capacidades de navegación. Aunque los humanos parecen estar en desventaja en cuanto al carácter instintivo de ese proceso, nuestra especie ha inventado los instrumentos necesarios para navegar con la misma precisión, no sólo de un lado a otro del planeta, sino también hacia las estrellas.

Bibliografía complementaria

Genetic Basis, Mode of Inheritance and Evolutionary Changes of Migratory Directions in Palaearctic Warblers (Aves: Sylviidae). A. J. Helbig en *The Journal of Experimental Biology*, vol. 199, págs. 49-55; 1996.

Virtual Migration in Tethered Flying Monarch Butterflies Reveals their Orientation Mechanisms. H. Mouritsen y B. J. Frost en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 99, págs. 10.162-10.166; 2002.

True Navigation and Magnetic Maps in Spinylobsters. L. C. Boles y K. J. Lohmann en *Nature*, vol. 421, n.º 6918, págs. 60-63; 2003.

Illuminating the Circadian Clock in Monarch Butterfly Migration. Oren Froy, Anthony L. Gotter, Amy L. Casselman, Steven M. Reppert en *Science*, vol. 300, n.º 5623, págs. 1303-1305, 23 de mayo, 2003.

Circannual Rhythms in Birds. E. Gwinner en *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 13, n.º 6, págs. 770-778; 2003.

Different Cortical Activations for Subjects using Allocentric or Egocentric Strategies in a Virtual Navigation Task. K. Jordan, J. Schadow, T. Wuestenberg, H. J. Heinze y L. Jancke en *Neuroreport*, vol. 15, n.º 1, págs. 135-140; 2004.



1. ¿CONTENDRA EL BOTIQUIN del futuro fármacos experimentales?

Administración de fármacos experimentales

Un juicio controvertido cuestiona la regulación del acceso a los fármacos experimentales y, en cierta medida, los criterios científicos del sistema de aprobación de los medicamentos

Beryl Lieff Benderly

Abigail Burroughs tenía sólo 21 años cuando falleció. Si su padre y sus partidarios cumplen su deseo, alcanzará una especie de inmortalidad, junto a Brown, Griswold, Roe y Miranda, un grupo de ciudadanos cuyo esfuerzo personal ha cambiado para siempre la forma de vivir de los estadounidenses.

Una demanda judicial, la *Alianza Abigail para un mejor acceso a fármacos experimentales contra Adrew von Eschenbach*, sostiene que las leyes gubernamentales impidieron a Burroughs la obtención de medicamentos experimentales contra el cáncer, con posibilidad de salvarle la vida, violando así su derecho constitucional de defender su vida. El Tribunal de Apelaciones del Distrito de Columbia dictaminó en agosto de 2007 en contra de esa reclamación, por lo que los demandantes se proponen apelar al Tribunal Supremo de los Estados Unidos. El desenlace final podría convertirse en una de las decisiones judiciales de mayor importancia y sin precedentes para la medicina, llegando a la cima de un conflicto que viene arrastrándose desde los inicios de la epidemia del sida. Por un lado, los pacientes terminales, que viven situaciones desgarradoras, reclaman el derecho de acceder a los fármacos todavía en fase de experimentación. Por otro, los científicos defienden el sistema estándar de regulación (una serie de ensayos clínicos que en total pueden durar unos 10 años) que viene utilizándose desde hace decenios para determinar la viabilidad de los medicamentos. Ambas partes velan por la vida de los pacientes, pero se contradicen en cuanto a cuál sea la mejor estrategia para alcanzar tan noble fin.

El otro protagonista de este juicio, posiblemente histórico, es el comisario de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA), el organismo que regula en los EE.UU. la venta de los medicamentos y los ensayos para determinar si un fármaco ofrece eficacia e inocuidad, y, por tanto, es apto para la comercialización. La agencia, que debe hacer frente a una fuerte presión para acelerar las aprobaciones de los fármacos, así como a las críticas implacables por su escasa sensibilidad en la toma de decisiones que afectarían a la salud pública, se negó a opinar sobre el caso.

Un triunfo de la Alianza ampliaría el acceso a medicamentos de los que apenas se ha demostrado su inocuidad y sin ninguna prueba de eficacia. Ello acabaría con el sistema de ensayos clínicos que ha impulsado un avance médico incomparable en el transcurso de 45 años, según la Sociedad para Ensayos Clínicos, uno de los numerosos oponentes. Si los pacientes obtuvieran los fármacos experimentales fuera de los ensayos clínicos, no se molestarían en participar en los mismos, por lo que se perdería la oportunidad de determinar, mediante un mecanismo que ofrece mayor seguridad, si una medicina es útil e inocua.

La esperanza de recibir ayuda causa que muchos pacientes se agreguen a los ensayos. Pero es de suponer que, antes de dar su consentimiento informado, se explica a los voluntarios el objetivo de los estudios en cuestión, que no es precisamente el de facilitar un tratamiento a los

CONCEPTOS BASICOS

- Los ensayos clínicos constituyen el método de referencia para demostrar la eficacia de los fármacos experimentales. Consumen dinero y tiempo, mientras las personas que han agotado todas las opciones terapéuticas puede que mueran a la espera de los resultados.
- Una demanda judicial reciente ha cuestionado los rigurosos requisitos que la FDA exige a los medicamentos que solicitan aprobación. Se pretende facilitar el acceso a los fármacos experimentales.
- Pero si todo el mundo pudiera acceder a los medicamentos experimentales (la mayoría de los cuales demuestran ser inútiles o incluso peligrosos), ¿se perdería la capacidad de reclutar individuos para los ensayos clínicos? ¿Terminarían los expertos sin disponer de un método para distinguir los fármacos realmente útiles del resto?

STEVEN PUETZER *Iconica/Getty Images*

participantes, sino el de establecer la toxicidad y la eficacia del medicamento. Deberían saber también que, según las estadísticas, la probabilidad de experimentar una mejoría es escasa, y conocer los riesgos reales de los productos químicos no sometidos a ensayo experimental.

Con todo, las investigaciones revelan que la mayoría de los individuos realizan una "interpretación terapéutica errónea" (en términos bioéticos): creen que los estudios pretenden curarlos y ofrecerles ayuda. Incluso algunos médicos malinterpretan las expectativas de sus pacientes en los ensayos. La incorporación a un estudio vendría a ser como ir al bingo: todo el mundo piensa que va a ganar, pero la mayoría vuelve con las manos vacías.

El largo camino hasta la prescripción farmacológica

En la raíz de los estudios clínicos modernos, que se remonta a varios decenios atrás, se halla la intención de proteger a los pacientes frente a los fármacos peligrosos. La Ley sobre alimentos, medicamentos y cosméticos de 1938 exigió que los fármacos que se vendieran en los EE.UU. demostraran su inocuidad, después de que 107 personas fallecieran a causa de un nuevo medicamento "milagroso", el elixir de sulfanilamida, que contenía dietilenglicol, un disolvente tóxico que se usa como anticongelante. En 1962, las enmiendas añadieron la exigencia de que los fármacos demostraran también su eficacia, después del escándalo de la talidomida. La experiencia de la talidomida provocó una auténtica catástrofe en numerosos países, pero representó un triunfo para la FDA. Empleada de forma generalizada fuera de los EE.UU. contra el insomnio y las náuseas del embarazo, la talidomida causó malformaciones graves en 10.000 recién nacidos. En EE.UU., el número de víctimas fue inferior, gracias a que un examinador de la FDA se mostró escéptico sobre los datos de inocuidad del fármaco y bloqueó su aprobación. Veinticinco años después, tras una prolongada presión de los activistas del sida, la FDA empezó a permitir, en circunstancias especiales, que los pacientes que sufrían una enfermedad potencialmente mortal y para la que no existía un tratamiento aprobado se arriesgaran a utilizar fármacos experimentales fuera de los ensayos. Según admitió la FDA, cuando la alternativa es una muerte segura, el balance entre riesgos y beneficios es otro. No obstante, las leyes estadounidenses no han reconocido todavía un derecho constitucional para los fármacos no aprobados.

La FDA calcula que el desarrollo y aprobación de un fármaco puede durar unos ocho años y medio; sólo una pequeña parte de los que inician el proceso lo terminan. La Asociación de Fabricantes e Investigadores Farmacéuticos de los EE.UU. estima que cinco de los 5000 compuestos que empiezan las pruebas preclínicas alcanzan la fase de ensayo en humanos y sólo uno de estos cinco terminan comercializados. El método de referencia en la investigación farmacológica, el ensayo clínico comparado con doble ciego, estudia un fármaco experimental en relación al mejor tratamiento estándar o, en ocasiones, respecto a una sustancia inactiva o placebo. Ni los pacientes ni el equipo médico que los atiende deben conocer qué sustancia recibe cada persona mientras dura el ensayo. Los

ESTUDIO DEL CASO

El Tribunal Supremo de los EE.UU. podría decidir pronto si examina las alegaciones sobre el acceso de los pacientes terminales a los fármacos experimentales.

EL PLEITO
Alianza Abigail para un acceso a fármacos experimentales contra Andrew von Eschenbach (el actual comisario de la FDA).

LA CONTIENDA
Las regulaciones de la FDA privaron a Abigail Burroughs de la obtención de medicamentos experimentales contra el cáncer (recomendados por su médico) con posibilidad de salvarle la vida; se violó así el derecho constitucional a defender su vida.

LOS HITOS
Julio de 2003: La Alianza Abigail y la Fundación Legal de Washington presentan la demanda.

Agosto de 2004: El Tribunal de Distrito de los EE.UU. desestima el caso, en parte porque "el tribunal no está convencido de que los demandantes soliciten un derecho constitucional reconocido".

Mayo de 2006: El Tribunal de Circuito de Apelaciones de los EE.UU. para el jurado de Distrito de Columbia dictamina, con dos votos a favor y uno en contra, que un "paciente adulto con una enfermedad terminal y plenitud de sus facultades mentales" tiene el derecho constitucional de utilizar, con el asesoramiento de un médico, cualquier fármaco que haya superado la primera de las tres fases del procedimiento de aprobación de la FDA.

Marzo de 2007: Los nueve miembros del Tribunal de Circuito examinan el nuevo planteamiento del caso.

Agosto de 2007: El Tribunal de Circuito vota, 8 a 2, contra los demandantes.



2. ABIGAIL BURROUGHS, que tenía 21 años cuando falleció de cáncer en 2001, intentó sumarse a los ensayos clínicos sobre los fármacos Erbitux (cetuximab) e Iressa (gefitinib), en fase experimental por entonces.



3. ERBITUX (*arriba*), comercializado por Bristol-Myers Squibb, recibió la aprobación en 2004; Iressa (*no ilustrado*), fabricado por AstraZenica, se aprobó en 2003 para el tratamiento de determinados tipos de cáncer.

CORTESIA DE FRANK BURROUGHS (*izquierda*); IMCLONE SYSTEMS, INC. (*derecha*)

participantes deben aceptar también que se asignarán al azar bien a un grupo experimental que recibirá el nuevo medicamento o a un grupo control que no lo recibirá.

Los ensayos clínicos, que se desarrollan en tres fases, se diseñan para poder realizar comparaciones estadísticamente válidas entre los grupos de estudio, no para proporcionar asistencia médica o curar a los participantes. La investigación clínica no constituye una actividad terapéutica dedicada a la atención personal de los pacientes, sino un experimento que responde a una pregunta científica, con el objetivo de obtener resultados generalizables. Los ensayos promueven la salud de los pacientes del futuro mediante el conocimiento científico derivado del ensayo sobre pacientes del presente, un propósito francamente útil.

En la fase I reciben el fármaco entre 20 y 80 individuos, algunos de ellos voluntarios sanos. Cuando se trata de sustancias de toxicidad elevada, como las anticancerígenas, el ensayo se realiza con pacientes que sufren una enfermedad avanzada y sin terapia eficaz. Esa fase tiene como objetivo conocer la dosis máxima inocua, efectos secundarios, la repercusión del fármaco sobre el metabolismo y su mecanismo de acción en los humanos.

Sólo en contadas ocasiones la fase I cosecha resultados que demuestran la eficacia del fármaco. Las sustancias que manifiestan la inocuidad suficiente obtienen el visto bueno para pasar a la siguiente fase, aunque el resultado sobre toxicidad no sea definitivo.

En la fase II se compara el fármaco experimental y la sustancia control en algunos centenares de personas que sufren la enfermedad. Se pretende verificar la eficacia del fármaco, los riesgos y los efectos secundarios a corto plazo. Si los resultados y el diseño del estudio son satisfactorios, el medicamento se somete a las pruebas de la fase III: se compara, en varios miles de personas que sufren la enfermedad, el fármaco en estudio frente a una sustancia control, con el fin de obtener datos más extensos sobre su eficacia e inocuidad. Según esos resultados, la FDA determina si el fármaco merece la aprobación.

Una espera demasiado larga

Los procedimientos actuales permiten que algunos pacientes con enfermedades graves o mortales, pero sin opciones terapéuticas aprobadas, obtengan, fuera de los ensayos clínicos, fármacos que han superado la segunda fase. La imposibilidad de Burroughs de conseguir ese tipo de fármaco esperanzador inspiró a su padre, Frank Burroughs, la creación de la Alianza en noviembre de 2001, tras la muerte de su hija a principios del mismo año. Durante los últimos meses de vida de Abigail, su oncólogo, de la Universidad Johns Hopkins, pensó que los fármacos cetuximab (Erbitux) o gefitinib (Iressa) podrían resultar eficaces para tratar el carcinoma escamoso de cabeza y cuello, debido a la abundancia de receptores del factor de crecimiento epidérmico (EGFR) en el tumor. Hasta esa fecha, ninguno de los dos había sido aprobado.

Para que se permita la experimentación en humanos, los promotores de los fármacos candidatos deben presentar datos de estudios preclínicos que demuestren su inocuidad y eficacia con una probabilidad razonable. El promotor debe también reclutar a los individuos para el experimento, quienes, cuando se trata del estudio de tratamientos para enfermedades graves o mortales, a menudo sufren un trastorno avanzado o carecen de opciones terapéuticas aprobadas (como Burroughs). Un ensayo clínico les facilita el acceso a un fármaco experimental, pero el beneficio que obtienen de dicha oportunidad depende de la fase del ensayo en la que se incorporan y del diseño del estudio. El promotor administra el fármaco experimental gratuito a los participantes, pero no está obligado a facilitarlo a otros más allá de sus existencias, a menudo limitadas.

Por ese motivo, según Scott Gottlieb, puede que un triunfo de la Alianza no facilite el acceso a los medicamentos en la medida en que muchas personas esperan. Gottlieb, antiguo comisario adjunto de la FDA para asuntos médicos y científicos y, en la actualidad, médico de consulta privada y miembro



EN LA MEMORIA

4. El ELIXIR DE SULFANILAMIDA, que contenía una sustancia tóxica utilizada como anticongelante, provocó la muerte a 107 personas en 1937. La tragedia aceleró la adopción de la Ley sobre comestibles, medicamentos y cosméticos del año 1938; según ésta, los fabricantes debían demostrar a la FDA la inocuidad de los fármacos antes de recibir el visto bueno para su comercialización.

CORTESIA DE LA OFICINA DE HISTORIA DE LA FDA





CORTESIA DE LA OFICINA DE HISTORIA DE LA FDA

RECONSIDERADO

5. THALOMID (TALIDOMIDA), fabricado por Celgene, se aprobó en 1998 para el tratamiento de un proceso inflamatorio de la enfermedad de Hansen o lepra. A principios del decenio de los sesenta, un examinador escéptico se opuso a la aprobación de la talidomida; los estadounidenses se salvaron así de los defectos congénitos experimentados en los países donde el medicamento se empleó para combatir las náuseas del embarazo.

DENEGADO

6. LAETRIL, vendido en otros países para el tratamiento del cáncer, no ha recibido la aprobación de la FDA porque no se ha demostrado su eficacia y produce efectos secundarios parecidos a la intoxicación por cianuro.

del Instituto de la Empresa de los EE.UU., afirma que el mayor impedimento para conseguir medicamentos fuera de los ensayos estriba en la falta de voluntad de algunas compañías en ofrecer el fármaco.

Un grupo de pacientes con la enfermedad de Parkinson perdió un pleito para forzar a Amgen Corporation a que continuara suministrándoles un fármaco experimental que ellos creían eficaz; los enfermos lo recibían como participantes de un ensayo que la compañía decidió abortar. Los promotores pueden abandonar un ensayo en cualquier momento. La FDA obliga también a interrumpir los ensayos cuando los "acontecimientos adversos" indican la existencia de un riesgo excesivo o cuando la eficacia es tan evidente, que resulta poco ético mantener el grupo control.

El estudio sobre Iressa no dio cabida a Burroughs; el estudio sobre Erbitux analizaba sólo el cáncer de colon. Ninguna de las compañías le proporcionaría el medicamento bajo la normativa que permite el empleo de fármacos experimentales fuera de los ensayos clínicos por razones humanitarias. La paciente falleció poco después de conseguir, por fin, la oportunidad de incorporarse a un ensayo sobre un tercer inhibidor de EGFR. Los dos fármacos a los que intentó acceder fueron aprobados en fecha posterior; Erbitux se administra hoy de forma general contra el cáncer que ella sufrió. El cofundador y consejero principal de la Alianza Abigail, Steven Walker, ha observado de cerca las ventajas de utilizar ese tipo de fármacos. La mujer de Walker fue tratada con Erbitux en un ensayo realizado en septiembre de 2002. "Resucitó": pasó de ser una enferma terminal y confinada en cama a incorporarse a la vida laboral y recuperar la práctica del esquí y el excursionismo. Sin embargo, tras la progresión marginal de la enfermedad en su hígado, dejó de administrársele el fármaco; falleció en junio de 2003.

¿Un sistema mejor?

El debate implica, en última instancia, un acuerdo sobre la mejor forma de atender a los pacientes a largo plazo: o bien se facilita el acceso a los fármacos prometedores (lo que podría dificultar el desarrollo de estudios clínicos serios y rigurosos) o se llevan a cabo evaluaciones más minuciosas (lo que podría impedir el acceso precoz aunque favorecería la obtención de datos clínicos precisos que orientarían la futura toma de decisiones). Así lo declara Gottlieb en un libro blanco publicado en febrero de 2007 por el Instituto Legal sobre Alimentos y Medicamentos, una organización educativa sin ánimo de lucro de Washington D.C.

Según Adil Shamoo, de la Universidad de Maryland, en lugar de generar datos científicos fiables, el libre acceso a los fármacos experimentales originaría ensayos clínicos de grandes dimensiones y no comparados que pondrían en peligro a los pacientes al exponerlos a sustancias químicas sin contrastar. Asimismo, retrasaría las investigaciones, al eliminar los incentivos para que los individuos se registren en los ensayos clínicos comparados y capaces de producir resultados válidos. Es más, las personas pagarían los fármacos que obtuvieran fuera de los ensayos; ello impulsaría a los promotores a vender el medicamento no aprobado, en vez de financiar los ensayos clínicos, rigurosos y caros, según razonó la FDA en su carta al Tribunal de Apelaciones.

Los críticos aducen que, si se autoriza a todos los enfermos la elección de cualquier fármaco, se influiría negativamente sobre los medicamentos prometedores, ya que las personas gravemente enfermas que utilizaran

sustancias inapropiadas podrían sufrir reacciones adversas; la FDA alegaría entonces esa toxicidad para rechazar fármacos que de otro modo podrían haber ayudado a pacientes cuidadosamente seleccionados.

No obstante, Walker afirma que el acceso libre terminará con el abandono de la gran mayoría de los pacientes que no consiguen entrar en los ensayos. En su opinión, el reclutamiento de pacientes no se vería perjudicado ya que, según la propuesta de la Alianza, cualquier persona que pretendiera obtener un fármaco experimental debería primero solicitar su incorporación a un ensayo clínico. Los pacientes tampoco tendrían acceso a sustancias peligrosas o ineficaces, porque nadie pretende en absoluto utilizar los fármacos en fase de investigación, a menos que exista algún indicio sobre su eficacia y se demuestre cierto grado de inocuidad.

También Perry Cohen, fundador y director del Proyecto Parkinson's Pipeline, una asociación de pacientes que se esfuerza en acelerar la innovación terapéutica, defiende la libertad de elección de los pacientes. Cohen, que se vio forzado a abandonar su puesto de consultor médico a causa de la enfermedad, es ahora un representante de los pacientes de la enfermedad de Parkinson en la FDA. Sostiene que, aun en el caso de que la consecuencia final no sea la muerte, las personas que, debido a una enfermedad grave, ven mermada su calidad de vida merecen el derecho a sopesar el balance entre riesgos y beneficios, con el asesoramiento de profesionales médicos expertos, y decidir si desean tomar los fármacos experimentales.



APROBADO

7. PENICILINA: la FDA ensayó el medicamento milagroso para usarlo en tiempo de guerra; más tarde lo certificó para el consumo público.



A RIESGO DEL COMPRADOR

8. COOPER'S NEW DISCOVERY y Mrs. Winslow's Soothing Syrup, medicinas patentadas antes de 1906 y de la creación de la FDA. Sus propiedades milagrosas se anunciaban con métodos extravagantes.



APROBADO

9. HUMULINA (INSULINA HUMANA). Comercializada por Eli Lilly, se convirtió en el primer fármaco modificado genéticamente aprobado por la FDA en 1982.

CORTESIA DE LA OFICINA DE HISTORIA DE LA FDA

LA SEGURIDAD EN CIFRAS

Los medicamentos nuevos deben superar tres etapas de ensayos clínicos antes de su comercialización. Tan sólo una pequeña proporción de fármacos candidatos concluyen el proceso de desarrollo y aprobación, que dura de 8 a 10 años.

Fase I: Pruebas para determinar la dosis máxima inocua y los efectos secundarios en un grupo variable de 20 a 80 voluntarios. Se investiga también la repercusión del medicamento en el metabolismo y su mecanismo de acción.

Fase II: Varios centenares de individuos reciben el fármaco en un ensayo sobre eficacia, riesgos y efectos secundarios a corto plazo.

Fase III: Se obtienen datos de mayor alcance sobre la utilidad y tolerancia del fármaco mediante pruebas en varios miles de personas.

La autora

Beryl Lieff Benderly
es periodista especializada en medicina y ciencia, de Washington D.C.

Los críticos rechazan esa línea argumentativa porque muchos efectos secundarios se detectan sólo a través de ensayos clínicos a gran escala. Una vez se ha otorgado el derecho a unos pocos, añaden, éste se extiende de forma inexorable a otros.

Permitir que el paciente escogiera entre fármacos sin aprobar no significaría que, de pronto, tuviera la posibilidad de encontrar la medicina indicada para él y para su enfermedad. Así lo considera Colin Begg, director de epidemiología y bioestadística del Centro del Cáncer Memorial Sloan-Kettering de Nueva York, y del comité de la Sociedad para Ensayos Clínicos, que ha publicado un artículo de opinión sobre las propuestas de la Alianza Abigail. El paciente tendría acceso a un amplio repertorio de fármacos, la mayoría de ellos ineficaces o tóxicos, sin una idea clara de cuál utilizar porque los médicos no expertos carecerían de datos científicos en los que basar su decisión.

Gottlieb cree, sin embargo, que el acuerdo no debería ser necesariamente tan extremo como apuntan las posiciones más radicales. Si mejorara el diseño de los ensayos podrían adelantarse los resultados, con la disminución de la espera para los fármacos nuevos y la reducción del número de participantes necesarios para los grupos control. Declara que deberían refinarse los instrumentos científicos que miden la respuesta al fármaco y el diseño de los ensayos clínicos, con métodos más adaptativos. El "método de referencia" se está derrumbando, añade Cohen. La mayoría de las enfermedades agudas que se ajustan a ese modelo ya han llegado a su fin. Lo mismo que Walker, Cohen reclama mayor agilidad a la aprobación y vaya seguida de un amplio control del medicamento después de su comercialización. Ello resulta factible gracias a la aplicación de las técnicas de información modernas, el diseño adaptativo y la estadística bayesiana. (Por ironía de las cosas, la FDA debe hacer frente, mientras tanto, a las críticas por la aprobación prematura de los fármacos rofecoxib [Vioxx], para el dolor, y troglitazona [Rezulin]), para la diabetes, cuya toxicidad ha obligado a retirarlas del mercado.)

La estadística bayesiana no requiere "experimentos perfectos". Se basa en datos del mundo real, datos "brutos"; extrae conclusiones sobre probabilidades a partir de conjuntos de datos no aleatorizados. El diseño adaptativo de ensayos permite realizar cambios mientras se desarrolla el ensayo, en función de los resultados que van emergiendo en el transcurso del experimento. Los investigadores, por ejemplo, modificarían la aleatorización para ofrecer a un mayor número de individuos un tratamiento que, en apariencia, provoca una respuesta mejor; o reclutarían a más pacientes de categorías determinadas porque, debido a sus características o reacciones individuales, se prevé en ellos una mayor eficacia del fármaco experimental.

Gottlieb, Walker y Cohen defienden también el empleo de criterios indirectos de valoración, en sustitución de los marcadores

ACORTAR EL CAMINO CRITICO

Aunque los ensayos clínicos constituyen el método de referencia para estudiar la toxicidad y eficacia de los fármacos y los dispositivos médicos, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) concede un amplio margen para mejorar los métodos experimentales destinados a los tratamientos prospectivos. Su Iniciativa del Camino Crítico, lanzada en 2004, responde a un afán de modernizar el proceso en todas sus etapas (desde el compuesto candidato al producto aprobado), con la esperanza de mejorar la calidad de los datos y acelerar la comercialización de los mejores medicamentos. Una lista de 76 proyectos prioritarios hace hincapié sobre la aplicación de los últimos instrumentos y técnicas científicos que permitan descartar en un primer momento las sustancias inútiles o tóxicas, y valorar con mayor rapidez si los fármacos evaluados desarrollan la acción buscada en la enfermedad.

Gran parte de los fármacos fracasan en los primeros ensayos con humanos porque causan lesión hepática u otras; en ocasiones, medicinas ya aprobadas deben retirarse del mercado por idéntica razón. Para evitar esas rectificaciones tardías y costosas, la FDA está colaborando con una compañía de modelización por ordenador para diseñar un "hígado virtual" que ayude a predecir si un compuesto puede ser tóxico para las personas, solo o combinado con otros medicamentos. Muchos proyectos del Camino Crítico se hallan también explorando el uso de biomarcadores, parámetros que informan sobre la actividad biológica en el organismo (concentración de ciertas proteínas, actividad de los genes o datos internos obtenidos mediante técnicas de formación de imágenes); estos criterios indirectos de valoración permiten evaluar la eficacia del medicamento sin tener que esperar a los resultados de un ensayo a gran escala con humanos.

En el curso de 2007 la FDA dio luz verde a los primeros ensayos de "fase 0" en humanos, con el fin de investigar la acción de un fármaco candidato sobre su objetivo en el cuerpo. En el primero de esos ensayos, los investigadores del Instituto Nacional del Cáncer administraron dosis mínimas de un compuesto denominado ABT-888 a seis pacientes con cáncer avanzado: observaron una disminución de más del 90 por ciento en la concentración de una proteína fundamental, un indicio sobre el que se basaron la FDA y el fabricante del fármaco para seguir adelante con los ensayos clínicos formales.

Otro objetivo de la agencia es acortar y agilizar esos estudios. Entre las estrategias consideradas para conseguirlo se incluyen la aplicación de un diseño adaptativo, que permite realizar cambios en el protocolo mientras el ensayo se está desarrollando, en función de los resultados preliminares. Las pruebas de los fármacos en combinaciones múltiples, que remedan su aplicación en el mundo real, acelerarían la aprobación. La introducción de los datos de los ensayos iniciales en los modelos informáticos de simulación contribuye a la identificación de las dosis más eficaces del fármaco para su administración en ensayos posteriores más ambiciosos. La FDA recomienda a los laboratorios farmacéuticos que reúnan los datos de cada fase del ensayo y utilicen técnicas bioinformáticas para extraer la máxima cantidad de información de ese material bruto, de modo que puedan identificarse pronto los problemas asociados a una clase entera de compuestos, así como los nuevos medicamentos de interés. —*Christine Soares*

CORTESIA DE LA OFICINA DE HISTORIA DE LA FDA





JOSH SHER (*caja de Vioxx*) Y JOHN KAPRIELIAN (*blíster de Vioxx*) *Photo Researchers, Inc.* (*izquierda*); JUSTIN SULLIVAN *Getty Images* (*derecha*)

fisiológicos, que predicen el desenlace clínico a partir de resultados reales (directos).

Esa gavilla de estrategias aceleran el desarrollo de los fármacos y hacen que los ensayos clínicos se centren más en los pacientes que mejorarán con mayor probabilidad, de modo que se obtiene información más fiable sobre quién sacará provecho del medicamento. En la actualidad, la FDA está evaluando las técnicas.

Begg advierte, sin embargo, que ese camino no lleva a la "tierra prometida". El cree que los métodos bayesianos constituyen adaptaciones menores del sistema de aleatorización de pacientes y de diseño de los estudios. Con ellos no se obtiene una respuesta más rápida, sino que se alarga la duración del ensayo. Los criterios indirectos de valoración no siempre ofrecen predicciones fiables del desenlace clínico. Esas técnicas tampoco resuelven las reclamaciones de la Alianza Abigail. Se trata sólo de una forma distinta de diseñar los ensayos clínicos. Además, deben realizarse todavía las pruebas de eficacia con los pacientes para discriminar entre fármacos útiles e inútiles.

Según la Sociedad para Ensayos Clínicos, en la larga historia de la investigación médica abundan los tratamientos que en un principio parecían de interés para los pacientes, los médicos y, sobre todo, para sus inventores, pero cuyo estudio exhaustivo reveló que no ejercían el efecto deseado o resultaban perjudiciales. Sólo en el campo del cáncer, se han descrito fracasos como el del laetril, que resultó prometedor en los estudios preliminares con animales, y la quimioterapia de dosis alta seguida de trasplante autólogo de médula ósea o de hemocitoblastos para el cáncer de mama. Miles de mujeres se sometieron a esa técnica experimental, costosa y atroz; algunas fallecieron a causa de la misma, después de un pleito que obligó a los aseguradores a pagar por los daños ocasionados, pero antes de que los ensayos clínicos demostraran que no era más eficaz que el tratamiento estándar.

Otras implicaciones

Los tribunales no decidirán sobre cuestiones relativas al diseño experimental o al análisis de riesgos y beneficios, sino sobre precedentes e interpretaciones legales. Un triunfo de la Alianza, apunta John A. Robertson, de la facultad de derecho de la Universidad de Texas en Austin, daría, por ejemplo, un vuelco a la normativa contra la obtención de células madre embrionarias. Bajo el principio reconocido en la Alianza Abigail, los tribunales tendrían que decidir si el estado protegería los embriones a expensas de la vida y la libertad del paciente.

Aun en el caso de que prevalezca el criterio de la FDA, es probable que se produzcan algunos cambios. La agencia está desarrollando nuevas reglamentaciones que, según dice, hará que resulte menos oneroso el rápido acceso a los fármacos fuera de los ensayos. Según Cohen, los científicos deben comprender que existe una crisis de confianza entre el público hacia los ensayos clínicos; la aparente inmutabilidad del modelo es parte de su causa. Cualquiera que sea el resultado de la Alianza Abigail, la salud del sistema de ensayos clínicos y, en consecuencia, de los estadounidenses, depende de la recuperación de dicha confianza.

RETIRADO

10. VIOXX (ROFECOXIB), un antiinflamatorio aprobado en 1999 cuyo uso se generalizó rápidamente, fue retirado del mercado en 2004 por su fabricante, MercK & Company, al despertar inquietudes sobre el riesgo de infarto de miocardio e ictus.

EN ALERTA

11. AVANDIA (ROSIGLITAZONA), fabricado por GlaxoSmithKline, se aprobó en 1999 para el tratamiento de la diabetes de tipo 2. En el curso de 2007 la FDA ha publicado varias alertas de toxicidad por su posible relación con el infarto de miocardio; el fármaco sigue comercializándose (los estudios de toxicidad no han concluido todavía), pero se han añadido advertencias del riesgo cardiovascular en el prospecto. Un medicamento de la misma clase para la diabetes de tipo 2, Rezulin (troglitazona), fue retirado en 2000 por la división Parke-Davis de Warner-Lamber, a petición de la FDA, debido al riesgo de toxicidad hepática.

Bibliografía complementaria

ACCESS BEFORE APPROVAL—A RIGHT TO TAKE EXPERIMENTAL DRUGS? Susan Okie en *New England Journal of Medicine*, vol. 355, n.º 5, págs. 437-440; 3 de agosto, 2006.

THE RIGHT TO A TRIAL. Jerome Groopman en *New Yorker*; 18 de diciembre, 2006.

CDER HANDBOOK, del Centro para la Evaluación y el Desarrollo de Medicamentos de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (documento en la Red).

Construcción de un dilatómetro

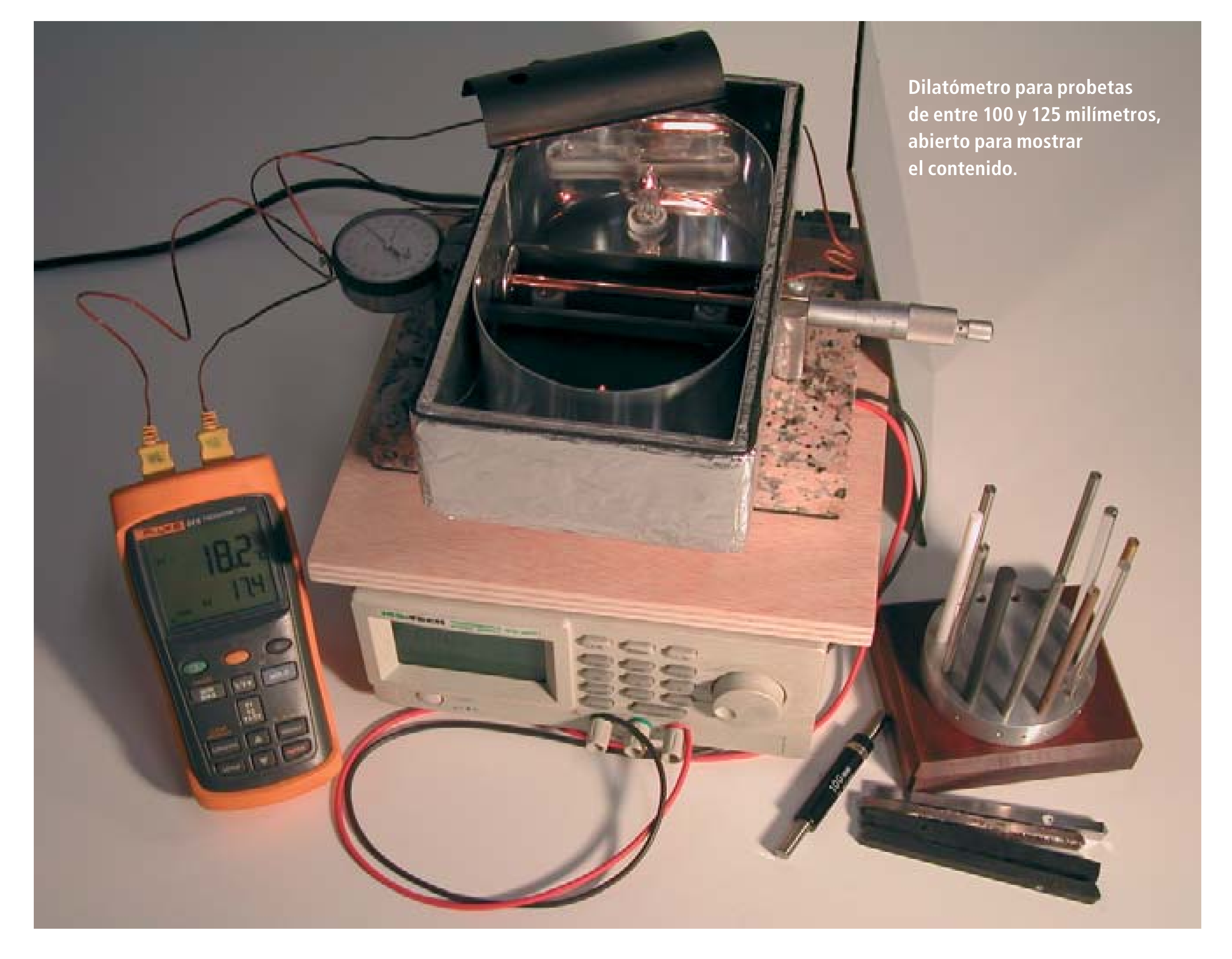
Todos los cuerpos, al calentarse, se expanden en mayor o menor grado. Mediante un dilatómetro medimos el coeficiente de dilatación de distintos materiales

Marc Boada

Tras su aparente estabilidad dimensional, la materia sólida esconde comportamientos que por conocidos no dejan de revestir importancia. Las dimensiones, o cotas, de un cuerpo sólido dependen de múltiples factores. Algunos materiales se estiran al hidratarse, otros lo hacen con la agresión química del medio; todos cambian su tamaño, en mayor o menor grado, cuando se modifica su temperatura.

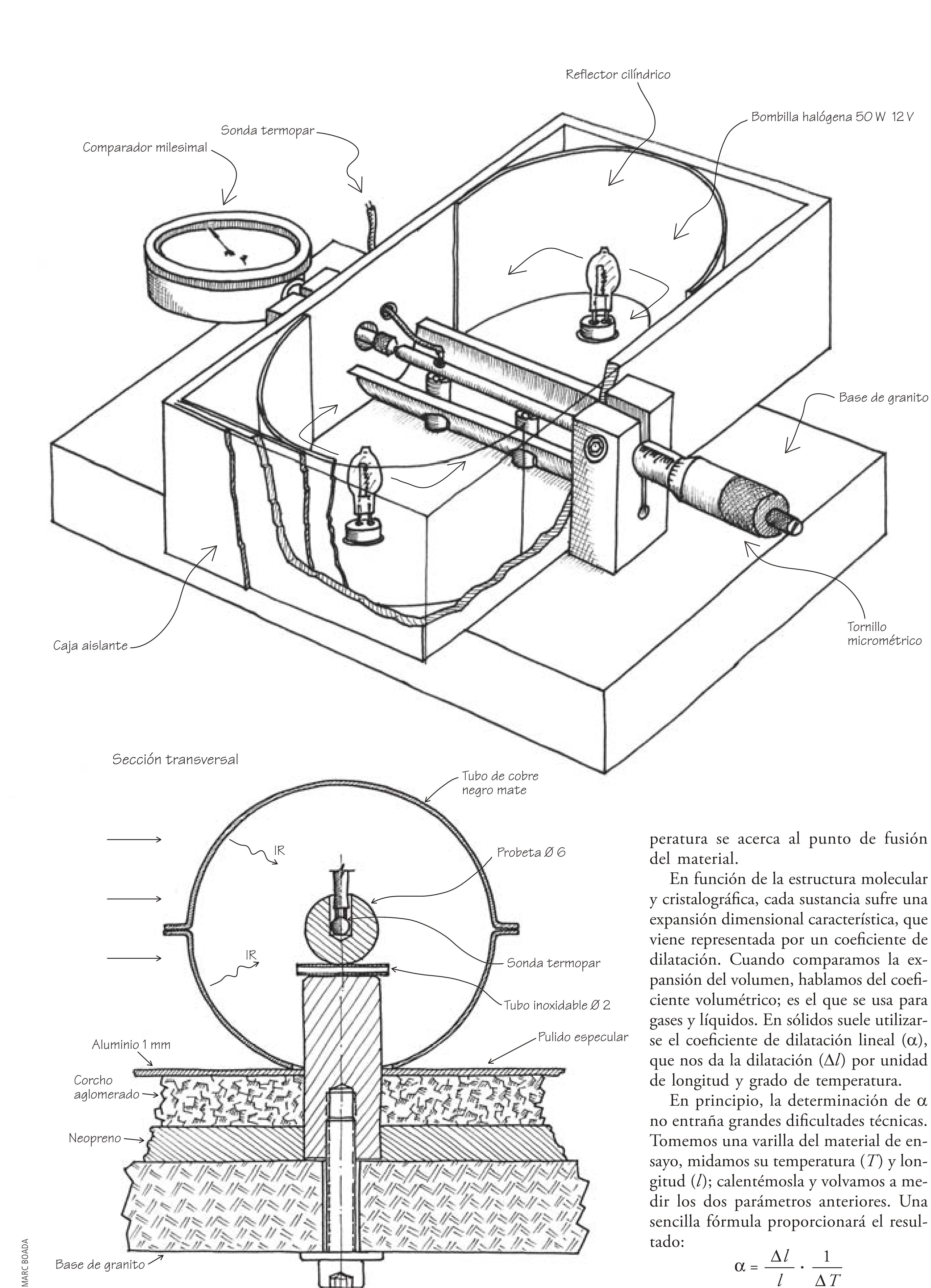
Sabemos que las vías del ferrocarril se fraccionan para absorber en las juntas las dilataciones que impone el ciclo térmico de día y noche. Pero, ¿cuál es la magnitud de esa dilatación? Una varilla de hierro de un metro de longitud se dilata por cada grado en que aumenta su temperatura algo más de 12 milésimas de milímetro. La cifra puede parecer insignificante; mas cuando la oscilación térmica es notable, la alteración de la longitud adquiere valores perceptibles. Volvamos al ferrocarril. En cualquier región fría de nuestro país, la temperatura del acero de las vías oscila entre –20 ºC y +60 ºC o más. Por tanto, con una amplitud térmica de 80 ºC, nuestra varilla de 1 metro sería casi un milímetro más larga un mediodía de verano que una fría noche invernal.

Para comprender el fenómeno de la dilatación térmica a escala molecular, imaginemos un átomo vibrando rapidísimamente alrededor de una posición fijada por sus vecinos próximos, también en vibración. Al elevarse la temperatura, la vibración térmica se incrementa también, lo que contrarresta las fuerzas de enlace con otros átomos y aumenta la distancia entre ellos. A escala macroscópica, todo ello acaba manifestándose como un incremento en volumen, que crece conforme la tem-



Dilatómetro para probetas de entre 100 y 125 milímetros, abierto para mostrar el contenido.

MARC BOADA



peratura se acerca al punto de fusión del material.

En función de la estructura molecular y cristalográfica, cada sustancia sufre una expansión dimensional característica, que viene representada por un coeficiente de dilatación. Cuando comparamos la expansión del volumen, hablamos del coeficiente volumétrico; es el que se usa para gases y líquidos. En sólidos suele utilizarse el coeficiente de dilatación lineal (α), que nos da la dilatación (Δl) por unidad de longitud y grado de temperatura.

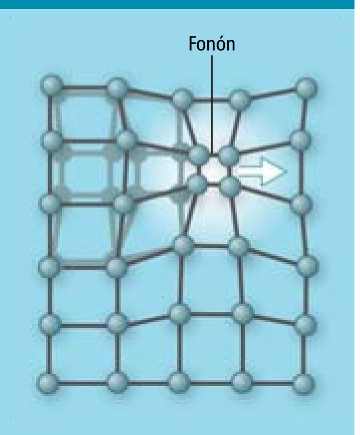
En principio, la determinación de α no entraña grandes dificultades técnicas. Tomemos una varilla del material de ensayo, midamos su temperatura (T) y longitud (l); calentémosla y volvamos a medir los dos parámetros anteriores. Una sencilla fórmula proporcionará el resultado:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{1}{\Delta T}$$

FONONES: EL ORIGEN MICROSCOPICO DE LA DILATACION

Bajo la dilatación térmica de la materia (fenómeno macroscópico) subyace la vibración atómica (fenómeno microscópico). Cuando calentamos un cuerpo (una pieza de cobre, por ejemplo), aparecen en el seno del material oscilaciones que se desplazan por éste como si fueran cuasipartículas; son los llamados fonones. De forma análoga a la luz, que se define como un conjunto de fotones, las vibraciones de la red cristalina vienen descritas por los fonones. También son los responsables de la propagación del sonido; de ahí su nombre ("phone" significa voz o sonido en griego).

Amén de la expansión térmica, los fonones dan origen a otros fenómenos macroscópicos: por ejemplo, la disminución de la conductividad eléctrica en los metales típicos. A temperaturas elevadas, el número medio de fonones de energía E es aproximadamente $n = k_B T/E$, donde k_B es la constante de Boltzmann y T la temperatura. Conforme aumenta la temperatura, crece, pues, linealmente el número de fonones de una energía determinada. Ello provoca la disminución de la conductividad, al aumentar el número de interacciones de los fonones con los electrones y, por tanto, dificultar la circulación de estos últimos.



En la práctica, sin embargo, las cosas no son tan sencillas: deben conocerse las cotas de la muestra de ensayo con una precisión mínima de centésimas de milímetro y las temperaturas con un decimal. Además, se produce una fluctuación de la longitud del instrumento de medida, lo cual, junto a otras perturbaciones, introduce un importante error instrumental.

Esos efectos se minimizan mediante el uso de un dilatómetro. Ese dispositivo consta, a grandes rasgos, de una base sólida sobre la que se instalan los aparatos de medida y una caja calefactora con soportes para la varilla de la cual deseamos conocer α.

Cuanto mayor es la longitud de la varilla, mayor es la dilatación y, por tanto, menor el error asociado a la imprecisión de la medición. Sin embargo, dada la complejidad técnica que entraña el empleo de varillas grandes, construiremos aparatos para el ensayo de probetas (muestras) de entre 100 y 500 milímetros. Yo he construido dos, uno para cada valor indicado, sobre una placa gruesa de granito, material que se adorna de dos propiedades importantes para nuestro dispositivo experimental: rigidez e inercia térmica y dimensional respecto de fluctuaciones de la temperatura ambiental y del calor generado por la caja calefactora.

Con un taladrador de mano, una broca de carburo de tungsteno y un poco de agua como refrigerante, practicaremos en esa placa pétrea cuatro taladros de 8 milímetros de diámetro. Fijaremos en ellos los soportes de la probeta, el tope ajustable y, por fin, el aparato de medida con su soporte. En uno de los lados de la pieza de granito abriremos un agujero para introducir hasta su centro una sonda de termómetro. Con los soportes instalados, procederemos a recubrir el granito con una lámina de material reflectante: cinta de aluminio autoadhesiva, por ejemplo.

Acometeremos luego la construcción del sistema de calefacción. Como fuente de calor pueden utilizarse diversos manantiales. Los más accesibles son los que se basan en calor Joule: simples bombillas de incandescencia, en las que el paso de electrones genera radiación infrarroja y algo de luz visible. Sirven 2 bulbos halógenos de 50 watt, alimentados a 12 volt mediante un transformador regulable.

Construiremos una caja en chapa de aluminio, de 1 o 2 milímetros de espesor. Una vez recubierta con un buen aislante térmico, deberá encajar entre los soportes del tope y el comparador. Por aislante emplearemos corcho aglomerado y combinado con capas de neopreno celular o cualquier otro material de baja conductividad.

En el interior de la caja colocaremos dos láminas delgadas de aluminio pulido, curvadas en forma de círculo, que focalizarán sobre la probeta de ensayo la luz de las bombillas situadas en la mitad de su radio de curvatura. Instalaremos la caja sobre la base de granito. Forraremos también la cara exterior de la caja con papel de aluminio para reducir la emisividad térmica.

Aunque la elevada reflectancia del interior de la caja favorece la distribución homogénea de la radiación calorífica que emiten las bombillas, ello no basta para garantizar que la probeta se caliente de manera uniforme. Añadiremos, pues, un elemento que distribuya el calor en toda su longitud: un tubo de cobre cortado por la mitad, es decir, dos semicilindros pintados en negro mate. Tras absorber la radiación procedente de las bombillas, el tubo de cobre se calienta por igual en todos sus puntos (es un conductor térmico excelente), de forma que radie luego hacia el interior el calor absorbido, iluminando en infrarrojo toda la superficie de la probeta.

Procederemos ahora a la instalación de los instrumentos de medida. Fijaremos el comparador en el soporte, que puede medir centésimas o milésimas de milímetro. Yo utilizo la versión centesimal para medidas en materiales con coeficiente de dilatación elevado, sobre todo polímeros; la versión milesimal, graduada en micrometros, la reservo para el estudio de metales y compuestos con bajo coeficiente de dilatación; tales, vidrios o cerámicas. Ajustamos la posición de la muestra mediante un tornillo perfectamente alineado con el eje del comparador; cuando éste es de paso fino e incorpora una escala graduada, sirve también para determinar la longitud inicial de la muestra. Mediante neopreno celular recubierto de aluminio reflectante, aislaremos los soportes de la probeta y los extremos del comparador y tornillo de ajuste.

Dado que el comparador y el tornillo de ajuste se hallan en contacto físico con la muestra, ésta los calentará. Para reducir ese flujo térmico instalaremos terminales esféricos pequeños en el comparador, siendo así casi puntual el contacto y, en consecuencia, mínima la transferencia energética. Por otro lado —y lo que reviste mayor importancia— mecanizaremos cónico o piramidal el extremo de la probeta en con-

JEN CHRISTIANSEN

tacto con el tornillo de ajuste, dejando un plano mínimo aunque sólido e indeformable.

A través de un taladro en la caja calefactora, introduciremos la sonda del termómetro (termopar) en la probeta; en esta última habremos preparado un alojamiento ajustado de unos 20 o 30 milímetros de profundidad que llenaremos de pasta conductora térmica para que el contacto entre la probeta y la sonda sea excelente. Acoplaremos, además, una segunda sonda de temperatura en el núcleo de la base de granito. Ello permitirá detectar las fluctuaciones térmicas y corregir las lecturas.

Para rematar el trabajo, limpiaremos a fondo, con una suave muñeca de papel humedecida con alcohol isopropílico, los elementos de contacto mecánico y las zonas activas ópticamente. Eliminaremos así toda traza de grasa sobre el aluminio y las bombillas halógenas.

Antes de estrenar el dilatómetro con una de las muestras de estudio, lo calibraremos con una varilla de longitud conocida. (En cualquier taller mecánico, podemos pedir en préstamo un calibre de 100 milímetros, que a 20 ºC no se desvía ni un micrometro de su longitud nominal.) Con ese "patrón" colocaremos a cero la escala del tornillo micrométrico de ajuste y, por tanto, podremos referenciar a éste cualquier otra probeta, eso sí, a 20 ºC.

La calibración del instrumento reviste suma importancia para la medida experimental, pues reduce los errores debidos a la imprecisión instrumental. Por ejemplo, cuando calentamos una muestra y la enfriamos luego hasta su temperatura inicial, el indicador de longitud (comparador) ya no marca cero. Esa "elevación del cero" aparece también en el calibrado de los termómetros de mercurio. En nuestro instrumento puede valer varios micrometros. Su origen radica en el tiempo de relajación del material en estudio y las inhomogeneidades térmicas de los componentes mecánicos.

Para minimizar esas perturbaciones, situaremos el aparato en una habitación con temperatura estable y pocas fuentes de calor; deberá estar siempre acompañado por las probetas, que tendrán así su misma temperatura. Procederemos al ensayo tomándolas con guantes o pinzas para que no se calienten; las colocaremos sobre los soportes con la intermediación de unos pequeños cilindros que permitirán su desplazamiento y reducirán las fugas de calor hacia la base.

Con la sonda en su alojamiento, ajustaremos la posición de la probeta hasta que el comparador marque cero. La taparemos luego con el semicilindro de cobre superior y la tapa exterior de aluminio reflectante. Para una mayor precisión, dejaremos en reposo el instrumento junto con la probeta durante algunas horas. Justo antes de empezar el ensayo, calibraremos de nuevo la posición del cero en el comparador.

En un experimento típico, la temperatura inicial rondará los 20 ºC. Calentaremos la muestra hasta que la lectura del termómetro crezca con lentitud, por ejemplo 0,1 ºC cada 5 segundos. Nuestro dilatómetro opera a una potencia máxima de 100 watt. Con tanta energía la probeta se calienta rápidamente, pero en su interior la temperatura no es homogénea. Las lecturas tienden, pues, a rebajar el coeficiente de dilatación. Reduciremos la potencia mediante el uso de una fuente de alimentación ajustable o reguladores de iluminación.

Mi instrumento tiene un consumo de unos 30 watt. Con esa potencia la temperatura de la probeta tiende a estabilizarse entre los 50 y los 60 ºC. Cuando detectemos esa estabilización, cesaremos el calentamiento; anotaremos poco después la temperatura máxima alcanzada por la probeta y, algo más tarde, su elongación extrema. Observaremos un cierto desajuste entre las dos lecturas, que depende de la conductividad térmica y del calor específico del material.

Podemos ensayar multitud de metales y compuestos. Para los primeros, obtendremos coeficientes de dilatación elevados ($23{,}0 \cdot 10^{-6}$ ºC^{-1} para el aluminio) o casi nulos ($1{,}5 \cdot 10^{-6}$ ºC^{-1} para el invar, una aleación de hierro con un 36 por ciento de níquel). Otros compuestos presentan valores negativos (–3~~ $5 \cdot 10^{-6}$ ºC^{-1} para la fibra de carbono en matriz de epóxido).

Nuestro dilatómetro proporcionará medidas fiables dentro del margen de temperaturas de ensayo. Dado que α no es constante (crece con la temperatura), nuestros resultados pueden presentar ligeras diferencias, de entre 1 o 2 micrometros, respecto de los valores publicados en los manuales, que suelen corresponder al promedio de un amplio margen de temperatura.

El caso de la moneda cambiada

Las mismas ideas matemáticas sirven para desenmascarar a un tramposo, interpretar imágenes de satélite o analizar el genoma

Juan M. R. Parrondo

Pablo entró en mi despacho jadeando, despeinado y con el nudo de la corbata aflojado. Sin duda, había tenido un mal día: "¡Me han robado más de tres mil euros! Tienes que ayudarme". Le pedí que se tranquilizara y tomara asiento. "Otra vez mi problema con el juego,... pero esta vez me han hecho trampas, me han engañado de verdad, y te necesito para desenmascarar al estafador. Me propuso jugar con una moneda: si salía cara, ganaba yo 100 euros, y si salía cruz, yo le daba 100 euros a él. Un juego estúpido, pero ya sabes que soy incapaz de decir que no. Probamos la moneda y me convencí de que no estaba trucada. De hecho, en las primeras tiradas gané algo de dinero, pero después cambió mi suerte. El caso es que estoy convencido de que el tipo reemplazó secretamente la moneda en algún momento durante las tres horas que estuvimos jugando. El casino nos cedió una sala y grabó la partida en vídeo, pero el responsable se niega a darme la cinta completa. Dice que únicamente puede dejarme revisar algunos fragmentos. De modo que necesito saber cuándo se hizo el cambio. Y aquí entras tú. Tengo la lista de los resultados de las 200 tiradas en que ha consistido la partida. En algún momento empezaron a aparecer más cruces que caras, pero no soy capaz de averiguar cuándo. Es endiabladamente difícil."

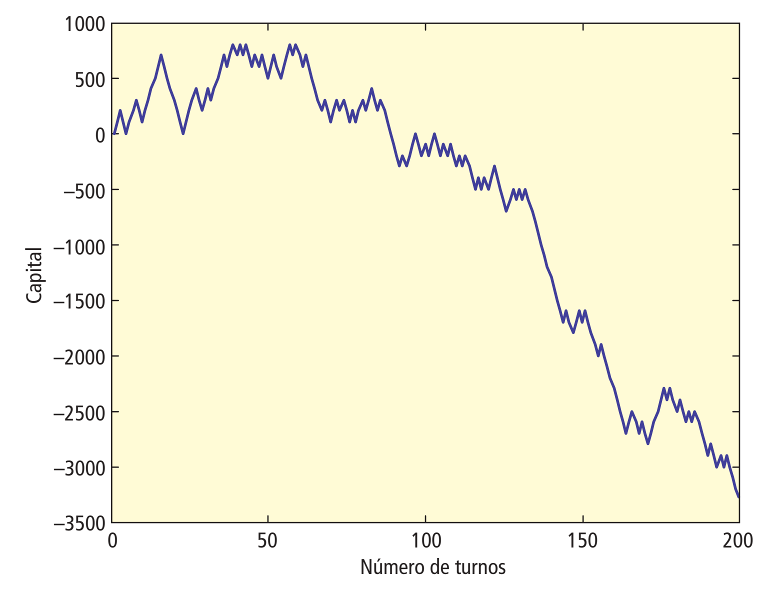
"Déjame esos datos. Veré qué se puede hacer." Pablo alargó una hoja arrugada y llena de números y letras. En ella estaban anotados los resultados de las doscientas tiradas y lo ganado en cada turno. Introdujimos los datos en una hoja de cálculo y comenzamos a analizarlos. La evolución del capital de mi amigo se puede ver en la figura 1. Es difícil determinar en qué momento cambió su suerte. Hay varios períodos de pérdidas sistemáticas, del turno 125 al 140, pero también un poco antes del turno 100 y también alrededor del turno 30. Para solucionar nuestro problema necesitamos un método más riguroso y cuantitativo que la simple inspección visual de la figura.

En esta sección hemos abordado problemas similares (*Fósiles y lotería*, abril de 2005), en los que se dispone de una serie de números o datos aleatorios, pero se desconocen algunos parámetros del procedimiento con el que dichos datos se han obtenido. En este caso, disponemos de los resultados de las tiradas e ignoramos en qué momento se ha cambiado la moneda y cuál es el sesgo de la nueva moneda (aunque esto a mi amigo no le importaba mucho). Uno de los métodos más utilizados para resolver este tipo de problemas es el de *máxima verosimilitud.* Consiste en calcular la probabilidad de que hayan salido los datos, en función de los parámetros desconocidos, y después buscar los parámetros que hacen que esta probabilidad sea máxima. De modo que apliqué la técnica a los datos de mi amigo Pablo.

Supongamos que la moneda inicial es justa y que ha sido reemplazada inmediatamente después del turno N por otra en donde la probabilidad de salir cara es p. Cualquier secuencia de resultados de los N primeros turnos es igualmente probable y su probabilidad es $(1/2)^N$. No ocurre así con los turnos siguientes, en donde la probabilidad de una secuencia de resultados depende del número n de caras que hayan aparecido. La probabilidad de una secuencia dada de resultados es el producto de 200 factores:

$$p_n = \left(\frac{1}{2}\right)^N p^n (1-p)^{200-N-n}$$

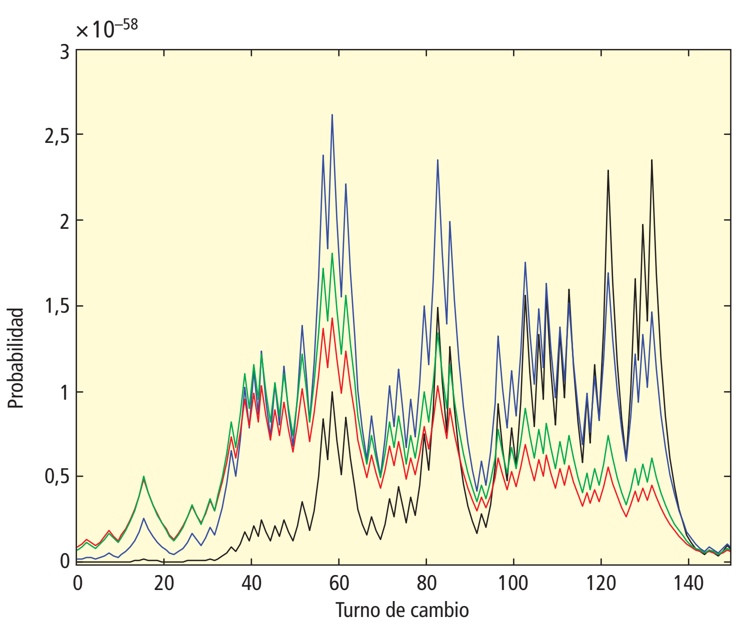
N factores valen 1/2, y corresponden a los resultados de los N primeros turnos jugados con la moneda justa; n factores valen p, que es la probabilidad de que salga cara con la moneda sesgada, y que corresponden a las n caras que han salido con dicha moneda; finalmente, $200-N-n$ es el número de cruces que han aparecido con la moneda sesgada y la probabilidad de que al lanzar dicha moneda salga una cruz es $1-p$. Observen que n depende de nuestro parámetro N puesto que, recordemos, n es el número de caras aparecidas después del cambio de moneda, que se produce en el turno N. Por lo tanto, p_n es una función de los resultados de las tiradas y, lo que es más importante, de los dos parámetros desconocidos: el turno de cam-



1. Evolución del capital de mi amigo en función del número de turnos.

bio, N, y el sesgo de la moneda trucada, p. En la figura 2 pueden ver el valor de p_n obtenido para los resultados de la partida que jugó Pablo, en función del turno de cambio N y para distintos valores de p.

El procedimiento de máxima verosimilitud nos dice que tenemos que escoger los valores de N y p que hacen máxima esta probabilidad. A la vista de la curva, deducimos entonces que los valores más probables de los dos parámetros son $N = 59$ y $p = 0{,}35$. Aunque hay otros valores con probabilidades cercanas (por ejemplo $N = 83$ y $p = 0{,}35$ o $N = 132$ y $p = 0{,}3$), me arriesgué y le dije a Pablo: “Busca alrededor del turno 59”. Reconozco que en la conclusión pesó también un argumento más psicológico que matemático: Pablo iba ganando bastante dinero en el turno 50 y es probable que el rival se pusiera nervioso y quisiera cambiar la moneda cuanto antes.



2. Probabilidad de que se dé la secuencia de datos que realmente ocurrió en la partida, en función del turno en el que se cambió la moneda y para distintos valores del sesgo de la moneda trucada: p = 0,3 (*curva negra*), 0,35 (*curva azul*), 0,39 (*curva verde*) y 0,4 (*curva roja*).

Lo cierto es que Pablo revisó las cintas de vídeo y, en efecto, pudo ver cómo el estafador había cambiado la moneda en el turno 67. A la vista de las pruebas, el tramposo confesó y devolvió el dinero a mi amigo. La moneda trucada tenía en realidad un sesgo $p = 0{,}39$. Como pueden observar, la estimación de máxima verosimilitud de N y p no es perfecta: el valor real, $N = 67$ y $p = 0{,}39$, tiene una probabilidad alta, aunque no máxima. Aun así, el método es bastante bueno, incluso con un reducido número de datos.

Existe otra forma más completa de obtener una estimación de los parámetros desconocidos: la estimación bayesiana, que ya examinamos en otra ocasión (*Fósiles y lotería*, abril de 2005). En la estimación bayesiana se utiliza una cierta distribución de probabilidad *a priori* para los parámetros desconocidos. Por ejemplo, podríamos considerar que N está uniformemente distribuido entre 10 y 150 (el tramposo no se atrevería a cambiar la moneda antes del turno 10, para que Pablo no desconfiara demasiado pronto y, por otro lado, le serviría de poco cambiarla más tarde del turno 150) y p entre 0,2 y 0,45. Como ven, hay cierta arbitrariedad en la elección de la distribución *a priori*, que depende de la información que poseemos acerca de los parámetros o de suposiciones razonables que realicemos sobre sus posibles valores. El método bayesiano permite calcular una nueva distribución de probabilidad incorporando los datos disponibles (en nuestro caso, el resultado de las 200 tiradas). Desgraciadamente, no tenemos aquí espacio para aplicar el método bayesiano a nuestro ejemplo.

¿Qué tiene que ver la historia de mi amigo ludópata con los satélites y la genómica? El enigma que me planteó Pablo es, en realidad, un conocido problema matemático que aparece en diversos campos: el *problema de la frontera*. En efecto, lo que hemos hecho en el caso del cambio de moneda, ha sido determinar la frontera que divide un tipo de comportamiento (la moneda justa) de otro (la moneda sesgada).

El mismo problema aparece cuando se analizan imágenes de satélite y se quiere obtener a partir de ellas y de forma automatizada una clasificación del terreno fotografiado. Imaginen que intentamos averiguar qué zonas del terreno corresponden a bosques y qué zonas corresponden a cultivos. Los píxeles de la imagen son como los resultados de las tiradas en nuestra historia. Su distribución de probabilidad diferirá si el terreno correspondiente a cada píxel es un bosque o un campo cultivado y la estimación de máxima verosimilitud (o la bayesiana) nos permitirá, igual que nos ha permitido averiguar el turno donde se efectuó la trampa, localizar la frontera entre el bosque y el cultivo.

El problema de la frontera aparece también en el análisis de secuencias de ADN. Hoy sabemos que la secuencia de ADN no es una mera concatenación de genes, es decir, de fragmentos que codifican proteínas. Existe el famoso ADN basura, cuya función es aún enigmática, e incluso las partes que sí codifican proteínas tienen una estructura bastante más compleja de lo que se creía: están formadas por fragmentos de gen (los exones) separados por otros (los intrones) que se traducen en ARN pero acaban desechándose en la fabricación de la proteína, mediante cortes y empalmes (un proceso que se denomina *splicing*). Los intrones y los exones son difíciles de distinguir, aunque las secuencias correspondientes tienen composiciones distintas desde un punto de vista estadístico. Identificar dónde acaba un exón y empieza un intrón, o viceversa, es fundamental para interpretar adecuadamente el genoma, es decir, para conocer la composición de las proteínas del organismo. Y, de nuevo, ésta es una tarea similar a averiguar en qué turno el rival de Pablo cambió la moneda.

Tanto en el análisis de imágenes de satélite como el de secuencias de ADN utilizan modelos más complicados que para un simple cambio de moneda. Se llaman genéricamente *modelos de Markov ocultos*. Todos ellos se basan en la misma idea: un sistema genera secuencias de datos (lanzamientos de moneda, píxeles, bases del ADN), pero la estadística de dichas secuencias depende del estado interno del sistema (moneda, origen de la imagen, tipo de fragmento de ADN), que a su vez cambia aleatoriamente.

Geotermia

Calor barato

Mark Fischetti

En muchos lugares se han aprobado “normas para la gestión de la energía renovable” que exigen a las compañías de servicios públicos que generen parte de la electricidad a partir de fuentes renovables. Las centrales eléctricas geotérmicas, que aprovechan el agua caliente o el vapor subterráneos, son prioritarias.

La mayoría de las compañías eléctricas no han mostrado interés por la energía geotérmica, sobre todo porque los costos iniciales, incluidos los sondeos, son elevados. (La geotermia explota yacimientos profundos, no el agua freática.) Pero ya en explotación, la central no consume combustible y genera unas emisiones mínimas en el peor caso. Si se consideran los costes reales a lo largo de la vida útil de las centrales, la geotérmica iguala o mejora a la de carbón, que es la opción estándar menos cara.

Además, un estudio reciente publicado por el Instituto de Tecnología de Massachusetts revela que el calor del subsuelo estadounidense es sorprendentemente elevado en todo el país. En la opinión de Gerald Nix, del Laboratorio Nacional de Energías Renovables en Golden (Colorado), la geotermia se ha infrautilizado.

Hace años que operan centrales eléctricas de distintos diseños en lugares elegidos en función de la temperatura del agua. Las plantas más corrientes son las de evaporación súbita, o rápidas. Pero en el futuro, según Nix, la supremacía será de las binarias. Estas, que emplean el agua para la vaporización de un segundo fluido, operan con agua menos caliente, lo que convierte a la geotermia en viable en la mayoría de los lugares.

Inquieta a algunos críticos que los yacimientos pudieran agotarse lentamente, ya que durante la conversión súbita en vapor se pierde una parte del agua y también cuando ese vapor se enfría después. Pero, salvo que el agua se extraiga a un ritmo excesivo, las entrañas de la Tierra repondrán de modo natural el yacimiento. Las centrales binarias devuelven al yacimiento prácticamente toda el agua extraída, aunque su explotación puede ser más cara que las rápidas.

En el futuro, las compañías de servicios emplearán procedimientos de recuperación “mejorados”, que aprovecharán el calor de las rocas secas calientes del substrato. En Europa está en marcha el proyecto Hot Dry Rock, en el que participan Francia, Alemania, Suiza e Italia, con un presupuesto de 810 millones de euros y una planta experimental en Soultz-sous-Forêts (Francia). El procedimiento Hot Dry Rock posibilita incluso que el propietario de una casa saque un rendimiento energético de su parcela. A sólo 3 metros de profundidad, el suelo permanece todo el año a una temperatura constante de entre 10 y 15 grados Celsius. Un circuito de tuberías rellenas de fluido puede alimentar una bomba de calor doméstica que dé frío en verano y calor en invierno. Al construir una casa nueva, la instalación de la bomba de calor no suele costar más que una caldera estándar. Pero ya no hay que comprar combustible. En cuatro o cinco años se recupera la inversión y se empieza a ahorrar dinero.

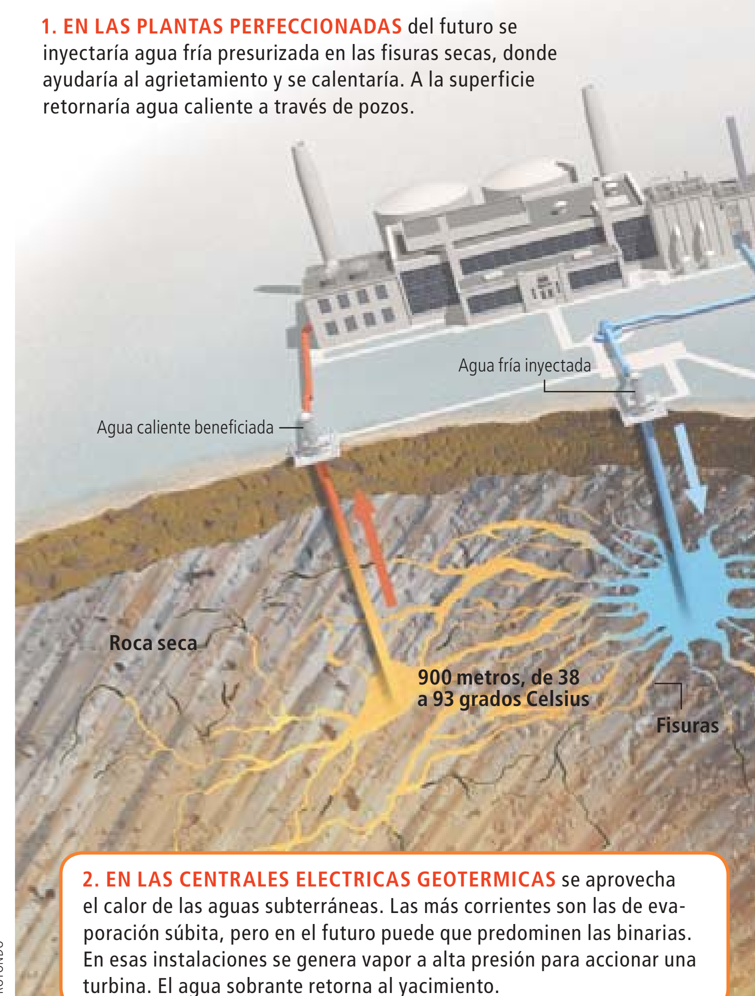
¿SABIA USTED QUE...?

➤ **GRANDES Y POCAS:** Veinticuatro países poseen centrales eléctricas geotérmicas, con una capacidad de generación conjunta global de 8900 megawatt. Con 2850 MW (2490 MW en California) EE.UU. es el participante líder, aunque ese total responde sólo del 0,36 por ciento del suministro eléctrico nacional. Desde 2000, la generación geotérmica se ha triplicado en Francia, Kenya y Rusia.

➤ **LEALTADES YA AÑEJAS:** “Los Géiseres”, a unos 115 kilómetros al norte de San Francisco, es el complejo geotérmico mayor del mundo. Inaugurado en 1960, tiene actualmente en servicio 21 centrales con una capacidad conjunta de 750 megawatt. La ciudad de Santa Rosa lo aprovecha transportando hacia él por bombeo sus aguas residuales, previamente tratadas, que se inyectan al yacimiento subterráneo para alargar la vida útil del mismo.

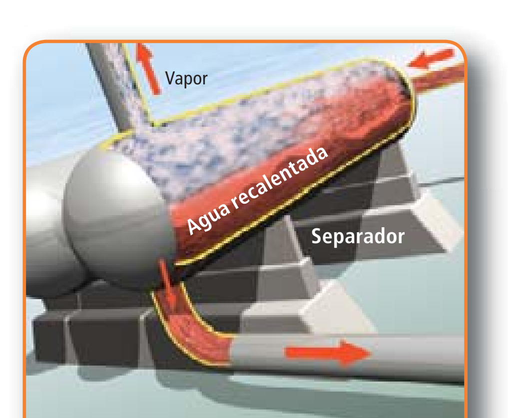
➤ **NO TAN LIMPIAS:** Algunas aguas profundas contienen gases condensados como dióxido de carbono o sulfuro de hidrógeno y minerales como el zinc. En las plantas de ebullición súbita esas impurezas deben ser capturadas o tratadas. En las plantas binarias, esos compuestos se devuelven al yacimiento. Deben evitarse las emisiones de los fluidos secundarios, como el isobutano, cuya evaporación forma parte el proceso.

1. EN LAS PLANTAS PERFECCIONADAS del futuro se inyectaría agua fría presurizada en las fisuras secas, donde ayudaría al agrietamiento y se calentaría. A la superficie retornaría agua caliente a través de pozos.



2. EN LAS CENTRALES ELECTRICAS GEOTERMICAS se aprovecha el calor de las aguas subterráneas. Las más corrientes son las de evaporación súbita, pero en el futuro puede que predominen las binarias. En esas instalaciones se genera vapor a alta presión para accionar una turbina. El agua sobrante retorna al yacimiento.

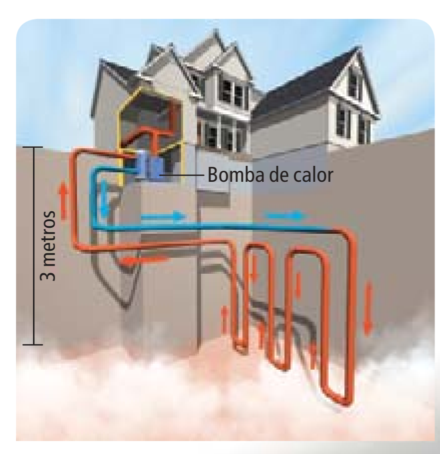
NICK ROTONDO



3. PLANTA RAPIDA. El agua recalentada a su presión naturalmente alta penetra en un separador que se halla a una presión menor. La caída de presión provoca la vaporización súbita de parte del fluido. El agua restante entra en una segunda cámara que está a una presión aún inferior, donde también hierve súbitamente. El vapor se condensa y se devuelve al yacimiento.

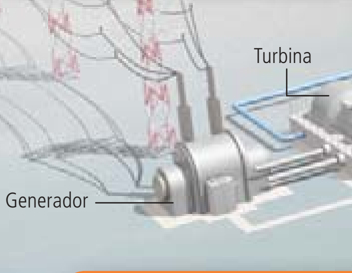


4. EDIFICIOS. Los edificios se caldean mediante el bombeo directo de agua o vapor que emergen en puntos próximos a la superficie.



5. CASAS. Una bomba de calor impulsa el fluido por tuberías o pozos enterrados a poca profundidad, que permanecen todo el año entre 10 y 15 grados Celsius. En verano, el fluido, relativamente más frío, extrae calor del interior de la casa. En invierno, el fluido, relativamente más caliente, cede calor al interior de la casa.

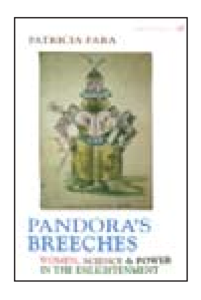
Turbina
Generador
Separador
Agua enfriada de retorno
Roca de recubrimiento
Agua caliente beneficiada
Roca de basamento



6. PLANTA BINARIA. El agua recalentada penetra en un intercambiador de calor, donde calienta un fluido, como el isobutano, de punto de ebullición inferior, que circula por otro circuito. Ese fluido hierve y crea vapor a alta presión.

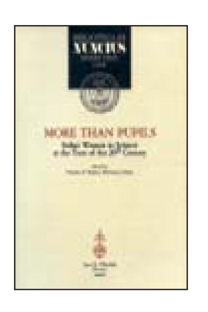
1500 metros
Magma

Para temperaturas mayores que 150 °C, se recomiendan las plantas rápidas; para temperaturas menores que 150 °C, las binarias.



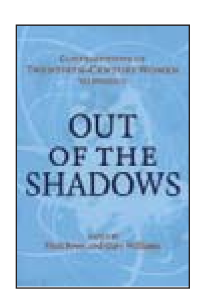
PANDORA'S BREECHES. WOMEN, SCIENCE AND POWER IN THE ENLIGHTENMENT,

por Patricia Fara. Pimlico, 2004.



MORE THAN PUPILS. ITALIAN WOMEN IN SCIENCE AT THE TURN OF THE 20TH CENTURY.

Dirigido por Valeria P. Babini, Raffaella Simili. Leo S. Olschki; Florencia, 2007.



OUT OF THE SHADOWS. CONTRIBUTIONS OF TWENTIETH-CENTURY WOMEN TO PHYSICS.

Dirigido por Nina Byers y Gary Williams. Cambridge University Press; Cambridge, 2006.

Mujer y ciencia

El nacimiento, desarrollo y consolidación de la ciencia resulta incomprensible sin el reconocimiento del papel determinante de la mujer

En el nacimiento de la ciencia estuvo presente la mujer (*Pandora's Breeches*). "Si Dios hubiera querido que las mujeres no fueran más que un ganado elegante y refinado, no las hubiera hecho razonables", escribía en 1673 Bathsua Makin, una de las primeras en reivindicar una educación común para los dos sexos. Pese a sus esfuerzos y de otras, las mujeres quedaron excluidas de la universidad hasta finales del siglo XIX. Pero se las ingeniaron para abrir nuevos caminos e intervenir en el desarrollo del saber. En los salones familiares, a través de la correspondencia, traduciendo libros ajenos y publicando los propios, su participación resultó determinante.

Aunque la historia recoge egregios precedentes (Aspasia de Milet, Hipatía de Alejandría o Hildegard de Bingen), la cadena aristotélica de los seres aceptada consideraba a la mujer una versión capitidisminuida del varón, dotada de una capacidad de pensamiento menoscabada. Contra esos prejuicios hubo de pugnar la Minerva del Norte, Cristina, reina de Suecia, quien se propuso convertir a Estocolmo en un centro cultural que rivalizara con París y Londres. Entre los científicos invitados llegó Descartes, pero sucumbió al frío polar y murió a los cinco meses de estancia, en 1650. Otra mujer importante en la vida de éste fue Elisabeth de Bohemia, versada en filosofía natural e íntima de Anna van Schurman, docente en la Universidad de Leiden y contertulia también de Descartes.

Famosas fueron en París las tertulias promovidas por Elizabeth Ferrand, aguda matemática cuyo salón frecuentaban Denis Diderot y Etienne Bonnot de Condillac.

Otras mujeres acaudaladas se entregaron a la historia natural creando espléndidas colecciones de conchas, minerales y flores prensadas. Sarah Sophia Banks compartía esa pasión con su hermano Joseph, presidente de la Regia Sociedad. Quizás ambos heredaran la afición de su madre, cuyo herbario fue el primer libro leído por Joseph. Aunque Sarah Sophia no participaba en las sesiones de la Regia Sociedad, protagonizaba los debates científicos que se desarrollaban en su residencia de Soho. La duquesa de Portland, Margaret Cavendish, protectora de la Regia Sociedad y crítica con su programa de experimentación, comenzó su imponente colección de plantas, animales y fósiles con los especímenes que James Cook le trajo de Australia.

Una caso paradigmático es el de Emilie de Châtelet. Pagó doblemente por su condición femenina: en vida, hubo de luchar por su formación y, tras su muerte, quedó oculta por la sombra de Voltaire, su amante y auténtico virtuoso de la autopropaganda. Desde joven se familiarizó con la filosofía de Descartes y de Leibniz. Aprendió matemáticas y dominó la física de Newton. Tradujo al francés y comentó los *Principia*. Había discutido sobre las ideas del inglés con Francesco Algarotti, su huésped y autor de *Il Newtonianismo per le dame* (Nápoles, 1737). En 1738 aparecieron los *Elements of Newton's Philosophy*, atribuidos a Voltaire, aunque con una participación importante de Emilie, donde se explicaban los principios de la nueva astronomía matemática y de óptica. Por fin ella pudo dar a la luz en 1740 *Institutions de Physique*, donde exponía con claridad las ideas de Newton y Leibniz. Por carta o por encuentros personales, Leibniz habló de ciencia y filosofía con numerosas mujeres de Europa. Sophie Charlotte, convertida en reina de Prusia, convenció a su marido sobre la importancia de la creación de una Academia Prusiana de las Ciencias, que rivalizara con las de Francia e Inglaterra, con Leibniz como presidente. Las conversaciones entre Leibniz y Sophie-Charlotte sobre la existencia del mal en el mundo fueron el germen de la *Teodicea* del primero. Y ejemplo de científico que contó con la ayuda de su propia esposa fue John Flamsteed, astrónomo real. Le asignó a su mujer Margaret tareas de observación y anotación de registros. A la muerte de su marido, Margaret Flamsteed se ocupó de la publicación del catálogo estelar, una referencia universal a lo largo de una centuria.

¿Qué papel ha desempeñado la mujer en la ciencia contemporánea? Fijémonos en la Italia recién unificada. La mayoría de sus universidades abrieron las puertas a la mujer en torno al año 1877 (*More than Pupils. Italian Women in Science at the Turn of the 20th Century*). De las 257 graduadas en el siglo XIX, 177 lo fueron en facultades de humanidades, 6 en derecho, 24 en medicina, 20 en matemática y 30 en ciencias. Anna Kuliscioff, Maria Montessori y Giuseppina Cattani representan el trío pionero de cuantas prepararon el camino para la plena participación de la mujer en la ciencia italiana. Lejos de la arena política, Cattani fue la primera mujer en obtener una plaza docente de patología general y presentó, en los años noventa, la primera terapia antitétanos en Italia. Aunque dedicada en un comienzo a la histología

del sistema nervioso, su figura va unida al debate sobre el origen del cólera y la búsqueda de un remedio contra la epidemia. Hoy sabemos que el tratamiento por rehidratación aconsejado a finales del siglo XIX fracasó porque los líquidos se administraban incorrectamente (subcutánea, intraabdominal o rectalmente). Sólo en 1911 se acometería la terapia de rehidratación intravenosa.

En torno a Giuseppe Peano encontramos dos alumnas brillantes: Margherita Peyroleri y Maria Gramegna, estudiosa aquélla de las relaciones entre el cálculo de diferencias finitas y el cálculo diferencial; y ésta de sistemas de ecuaciones diferenciales lineales e integrodiferenciales. Usando los símbolos aprendidos en los cursos de Peano, Gramegna llegó a resultados originales, presentados por el propio Peano en la Academia de Ciencias de Turín. Ante la misma institución expuso Peano las *Proposizioni universali e particolari, e definizione di limite*, de Maria Cibrario. Asimismo, bajo la sombra de Vito Volterra se habían formado varias mujeres de notable potencia matemática. Tal, Cornelia Fabri, de Ravena, que sobresalió en el campo del análisis y la electrostática. Consagró varios trabajos a la teoría de vórtices, que culminaron en 1895 con *I moti vorticosi di ordine superiore in relazione alle equazioni pel movimento dei fluidi viscosi compressibili*. Podemos cerrar el círculo matemático con Elena Freda, graduada en 1912 por la Universidad de Roma bajo supervisión de Guido Castelnuovo y luego en 1915 en física con una tesis dirigida por Orso Mario Corbino. Trabajó en geometría no euclídea y proyectiva y análisis de funciones. Ahondó en la unificación de física experimental y análisis matemático con su *Teoria elettronica delle forze elettromagnetiche*. Volterra redactó la introducción de su libro *Méthode des caractéristiques ou l'intégration des équations aux dérivées partielles linéaires hyperboliques*.

Avanzada de la limnología fue Cesarina Monti. Nacida en 1871 en Arcisate, innovó la biología de agua dulce con la reelaboración de métodos y conceptos procedentes de la fisiología, la citología, la anatomía comparada, la ecología y la embriología. Sus primeros pasos, sin embargo, nos llevan al laboratorio de Golgi, donde trabajó sobre modificaciones de su famosa reacción negra. Allí preparó sus *Ricerche microscopiche sul sistema nervoso degli insetti*. Un trabajo posterior sobre la misma cuestión mereció el aprecio de Gustaf Retzius y de Santiago Ramón y Cajal. En el marco de la física italiana, Rita Brunetti, discípula de Antonio Garbasso, entró en la historia con su investigación en espectroscopía en la región visible y de rayos X. Identificó el elemento con el número atómico 61. En 1928 fue nombrada directora del Instituto de Física Experimental de la Universidad de Cagliari; abordó el comportamiento paramagnético de iones de los elementos de tierras raras y estudios teóricos sobre el paramagnetismo de iones de elementos ferromagnéticos.

La física constituyó a lo largo de la primera mitad del siglo XX la ciencia por excelencia, con su renovación radical a través de la relatividad y la mecánica cuántica. La presencia femenina, sabemos, resultó determinante en numerosos campos (*Out of the Shadows. Contributions of Twentieth-Century Women to Physics*). Aunque conviene señalar que la mujer no estuvo ausente en las demás disciplinas; por ejemplo, en la genética entonces emergente, con la labor impulsora de la noruega Kristine Bonnerie, la alemana Elisabeth Schiemann o la holandesa Tine Tammes.

También aquí los inicios fueron duros. Marietta Blau, que trabajó de 1923 a 1928 en el Instituto para la Investigación del Radio en la Universidad de Viena, disponía de un banco en el laboratorio y cierta subvención para material, pero no un salario. En su clásico *Física atómica*, Max Born recordaba: "Se produjo un gran adelanto con dos señoritas vienesas, Blau y Wambacher, quienes descubrieron un método fotográfico para registrar las trazas dejadas por las partículas". Los métodos de Blau fueron adoptados por C. E. Powell en Bristol, quien los mejoró y ganó en 1950 el premio Nobel de física por su "desarrollo del método fotográfico para el estudio de los procesos nucleares y sus descubrimientos concernientes a los mesones realizados con ese método". Decenios antes, Agnes Pockels realizaba en la cocina de su casa, con aparatos que ella misma ideaba y fabricaba, experimentos sobre química de superficies, donde se establecían las bases del dominio cuyo cultivo le valdría a Irving Langmuir, el premio Nobel de 1932.

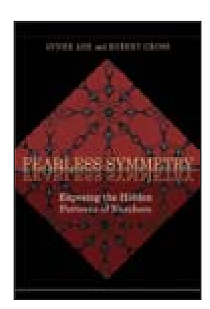
No están todas en este florilegio de cuarenta. Falta, por ejemplo, Vanna Cocconi, cuyos inicios experimentales en rayos cósmicos evocan una época de científicos intrépidos. Con su marido Giuseppe compartía la carga de conducir el camión repleto de detectores de rayos cósmicos hasta la cumbre del Monte Evans, construir cámaras de niebla y circuitos electrónicos, criar el hijo y gobernar la casa. Descubrió los fenómenos del apantallamiento nuclear, observando los grandes pulsos de neutrones emitidos cuando un rayo cósmico de alta energía choca contra un núcleo pesado. En los años sesenta Vanna ayudó a establecer la poderosa cámara de burbujas del CERN. Más tarde demostró la autocorrelación de los piones debida a la estadística cuántica. Otra mujer decidida fue Cécile Morette. Desaparecido de la escena Louis de Broglie, a ella se le debe la renovación de la física teórica en Francia, tras la debacle de la Segunda Guerra, entre otras iniciativas con la fundación de la Escuela de Verano de Les Houches, donde se reunían estudiantes de toda Europa para ponerse al día en los avances de la física. Muchos de aquellos alumnos levantarían la ciencia de sus países de origen. Allí se forjó Georges Charpak.

Los retratos biográficos dibujan, en efecto, una época de descubrimientos de largo alcance. Sea por caso Mary Cartwright. En la Segunda Guerra, los radares ingleses se guiaban por amplificadores, que mostraban un comportamiento defectuoso si se les impulsaba hasta potencias muy elevadas. La Fuerza Aérea devolvió los radares para su reparación a los fabricantes. Cartwright demostró que éstos no tenían la culpa; la responsabilidad recaía en la ecuación de Van der Pol, fórmula estándar para describir un amplificador no lineal. A medida que aumenta la potencia, las soluciones periódicas se pierden en una secuencia infinita de doblamiento del período para terminar convertidas en aperiódicas: el caos. Esas soluciones aperiódicas comportan efectos desastrosos sobre el radar.

Persisten las injusticias. De acuerdo con el principio de san Mateo, los artículos de los científicos más famosos son los más citados en las revistas científicas. Pero, ¿fueron suyos? Recordemos el caso del descubrimiento de la relación período/luminosidad de las estrellas variables Cefeidas, que permitió las primeras mediciones de las distancias intergalácticas. Fue realizado por Henrietta Leavitt. Su hallazgo apareció referenciado en la *Harvard College Observatory Circular*, de

3 de marzo de 1912. Sin embargo, ese informe aparecía firmado por Edward C. Pickering, director del Observatorio Universitario de Harvard. Pese a quedar explícita la autoría de Leavitt en el texto, ha pasado a la historia como el descubrimiento de Pickering. A menudo suele asociarse sólo al premio Nobel Otto Hahn con el hallazgo de la fisión nuclear. La verdad es que tal descubrimiento fue realizado por Hahn, Fritz Strassmann y Lise Meitner. El trabajo se inició y desarrolló en el laboratorio de Meitner en Berlín. Lise, judía, tuvo que huir de la persecución nazi en 1938. El descubrimiento fue anunciado por Hahn y Strassmann en 1939.

—*Luis Alonso*



FEARLESS SYMMETRY. EXPOSING THE HIDDEN PATTERNS OF NUMBERS

por Avner Ash y Robert Gross. Princeton University Press; Princeton, 2006.

Fermat y su horizonte

En la demostración del teorema de Fermat se engarzan conceptos procedentes de campos matemáticos alejados

Han pasado ya más de trece años desde que, en junio de 1993, el matemático inglés Andrew Wiles [1953-] afirmara, en una conferencia en Cambridge, que había demostrado, por fin, el famoso *teorema de Fermat*: "Si $n \geq 3$ es un entero positivo, la ecuación $x^n + y^n = z^n$ carece de soluciones enteras". Su demostración, tras ser sometida a correcciones y mejoras, fue publicada en *Annals of Mathematics* (1995). Así culminaba la resolución de un problema *abierto* de la aritmética que se había iniciado con la famosa anotación que Pierre de Fermat [1601-1665] había escrito en el margen del problema 8 del capítulo II de la *Aritmética* de Diofanto [III d.C.], traducida al latín con comentarios por Claude-Gaspard Bachet de Méziriac [1581-1638], según la cual disponía de una demostración, pero el margen era demasiado reducido para contenerla.

La noticia de la demostración trascendió pronto el ámbito académico. El periodista inglés Simon Sighn ofreció en la BBC una serie de reportajes, entre históricos y divulgativos, del proceso técnico y humano que había conducido a ella. Ese trabajo fue recogido, en 1997, en *Fermat's Enigma*. El texto eludía, sin embargo, los conceptos técnicos que permiten comprender la enorme trabazón que existe entre partes de las matemáticas que, para numerosos profesionales y en el currículum docente de la licenciatura de matemáticas, pertenecen a ámbitos claramente separados y aun disjuntos.

El texto de Ash y Gross pretende, de forma divulgativa pero técnica, poner de manifiesto este entramado. Para ello, como el título indica, han elegido como *leitmotiv,* el concepto de *simetría*, entendida como "una función que preserva lo que intuimos que es importante de un objeto (matemático)" (p. 96), en la línea con que este concepto fue tratado en *Symmetry*, de Hermann Weyl [1885-1955].

Cabe decir que el texto que nos ocupa está pensado para lectores interesados en comprender el intríngulis de los conceptos matemáticos básicos, con sus relaciones íntimas, involucrados en la prueba del teorema de Fermat. Para ello es preciso tener claros los conceptos de grupo y de cuerpo, el lenguaje de las congruencias, la ley de reciprocidad cuadrática, un mínimo de teoría de Galois, sin olvidar las curvas elípticas, así como el conjunto de sus soluciones junto con el grupo que, de forma natural, admite, y los elementos de torsión, que son siempre de coordenadas algebraicas.

Seguidamente se introducen las representaciones de grupos con especial hincapié en aquellas cuyas imágenes son permutaciones, o matrices. Estas últimas permiten comprender el significado del carácter de un elemento de un grupo finito. Los autores sistematizan las propiedades básicas de cada uno de esos conceptos y la conexión que hay entre ellos. Se abre así la puerta a un concepto más complejo, introducido por Georg Ferdinad Frobenius [1849-1917], $Frob_p\theta$, en donde p designa un número primo adecuado y θ un número algebraico, así como su relación con la factorización de polinomios.

Todos esos conceptos se introducen con sencillez y claridad, lo cual es de agradecer, puesto que, no por ello, dejan de ser conceptos técnicos, algunos incluso de una gran abstracción y muy poco naturales para los alejados del tema. La exposición va acompañada de ejercicios y ejemplos cuyo objetivo es coadyuvar a una mejor comprensión. Se omiten las pruebas precisas, enunciando sin embargo, cuando son relevantes para la comprensión del texto, los teoremas que establecen sus propiedades y sus ligámenes.

Con este bagaje, en la tercera y última parte, los autores muestran cómo se engarzan todos los conceptos, cómo deben generalizarse cuando el resultado así lo demanda, para establecer, en el capítulo 22, la demostración del teorema de Fermat.

El esfuerzo metodológico y didáctico de los autores es importante. Ello no obstante, el texto sólo podrá ser comprendido por quienes tengan un interés real en el objetivo del texto: una aproximación a la prueba del teorema de Fermat. Entiendo, además, que es preciso que el lector esté acostumbrado al razonamiento matemático o, en caso contrario, dispuesto a acercarse a él sin prejuicios. De no darse esas dos circunstancias, *Fearless Symmetry* resultará incomprensible, excesivamente técnico e incluso contraproducente. En tal caso, al lector interesado en una aproximación al tema, le aconsejo el texto, mucho más periodístico, divulgativo y ameno (salvo en el último capítulo) de Simon Singh.

Resulta difícil calibrar el éxito que el libro pueda tener. Sin embargo, si el éxito de un libro guardara relación con el denuedo de quienes lo han pensado y escrito, este texto se merecería una cifra importante de lectores, tal es el esfuerzo de concisión y claridad empeñado.

—*Josep Pla i Carrera*

Acabar con las muertes por malaria en Africa

Una de las enfermedades que más defunciones ocasionan en el mundo se puede frenar pronto con la inversión adecuada

Jeffrey D. Sachs

Africa, el epicentro mundial del azote de la malaria, tiene ahora en la mano un gran avance histórico en salud y desarrollo económico. Una combinación de avances técnicos, nuevos métodos de control de enfermedades y mayor conciencia pública está lista para reducir las muertes por malaria en un 90 por ciento o más. Sólo hace falta llevarla a cabo.

En los años cincuenta y sesenta del pasado siglo, las campañas para controlar la malaria utilizaron con éxito el insecticida DDT y un medicamento, la cloroquina, para eliminar la enfermedad en muchas regiones templadas y subtropicales. Pero la malaria persistió en los trópicos y especialmente en Africa, donde la intensidad de su transmisión es la más alta del mundo, por razones ecológicas. Africa paga un precio terrible por el lastre permanente de la malaria: no sólo en más de un millón de muertes anuales, sino también en una significativa reducción del crecimiento económico.

Hasta hace poco las cosas no sólo no mejoraban, sino que iban a peor. El parásito de la malaria se ha vuelto muy resistente a la cloroquina. La confusión entre la aplicación prudente del DDT contra el paludismo (pulverizar una fina película en los muros interiores de las casas) y su uso como insecticida en campos abiertos (que es peligroso para el medio y desarrolla resistencia) restringió también el uso de este producto químico.

La solución más satisfactoria a largo plazo es una vacuna. Existen vacunas prometedoras que se encuentran en período de ensayo clínico. Aun así, incluso mientras esperamos esa vacuna, una confluencia de avances brinda la oportunidad de que se produzca un gran adelanto en un plazo cercano. El primero son unas mosquiteras, tratadas con insecticida de larga duración, que protegen de las picaduras a quienes duermen en el interior de las viviendas. Estas mosquiteras duran cinco años, a diferencia de las anteriores, que requerían tratamiento con insecticida cada pocos meses.

El segundo avance, que puede salvar innumerables vidas, es una nueva generación de medicamentos altamente efectivos, basados en la artemisinina, un extracto de artemisia descubierto por científicos chinos. (No obstante, la artemisinina debería usarse solamente en combinación con medicinas más tradicionales para prevenir que los parásitos desarrollen resistencia.)

El tercer avance es una nueva forma de enfocar el control de las enfermedades. En el pasado, el gobierno de EE.UU. y otros donantes optaron por la venta de mosquiteras a precio reducido. Tuvo muy escasa acogida porque la mayoría de las familias africanas rurales eran demasiado pobres para adquirir las mosquiteras. Además, los bajos precios sólo valían para niños pequeños y mujeres embarazadas, el grupo más proclive a morir de malaria. Esa política de selección descuidó una cuestión crucial: las personas no protegidas sirven como reservorio para la infección de malaria, no ya porque enfermen ellas mismas, sino porque propician la transmisión a los grupos "protegidos", ya que las mosquiteras no son cien por ciento efectivas.

El control del paludismo es una ganga para el mundo

La nueva estrategia se apoya en la distribución libre y masiva de mosquiteras, una para cada lecho. Todos quedan protegidos de la enfermedad y ningún grupo se queda como reservorio para la transmisión. Los medicamentos basados en la artemisinina también deberían ser gratuitos en los pueblos. Esta propuesta es muy asequible para los países donantes, porque una red no cuesta más de cinco dólares, y cada dosis de la medicina, alrededor de uno. La distribución gratuita de las mosquiteras se está ya efectuando con éxito en varios países pobres.

El control del paludismo es una ganga para el mundo. Un estudio que mis colaboradores y yo llevamos a cabo recientemente muestra que la cobertura integral de mosquiteras y medicamentos, así como de insecticida de interior donde sea aconsejable, puede alcanzarse por tres mil millones de dólares anuales en los próximos años, lo que equivale a sólo tres dólares por cada habitante de las regiones del mundo con alto nivel de ingresos. Asimismo, estos costes irían reduciéndose en años posteriores a medida que disminuyera la tasa de infección. Además de las vidas que se salvarían, los beneficios económicos para Africa pronto alcanzarían los diez mil millones de dólares anuales, resultado de la reducción directa del coste de las enfermedades y del aumento del crecimiento económico.

Ya se dispone de las fuentes de financiación. El Fondo Global de Lucha contra el Sida, la Tuberculosis y la Malaria es fuente de fondos y líder natural. El Banco Mundial puede desempeñar una función decisiva, especialmente porque su nuevo presidente, Robert B. Zoelick, ya ha mostrado anteriormente capacidad de mando en este asunto. La administración Bush ha incrementado recientemente los fondos para la malaria. El sector privado se halla listo para aumentar su apoyo de distintas maneras, y el público está ya donando cientos de millones de dólares con que comprar mosquiteras para los pobres a través de organizaciones como Malaria No More (No Más Malaria). Estamos en el umbral de conseguir un importante avance. Es ahora el momento de cruzarlo.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

MATT COLLINS

INDICE ANUAL

Este índice contiene los títulos de los artículos y los nombres de los autores aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 2007*

TITULOS

AUTORES

EN EL PROXIMO NUMERO DE ENERO 2008



¿Nuevas ojivas nucleares?

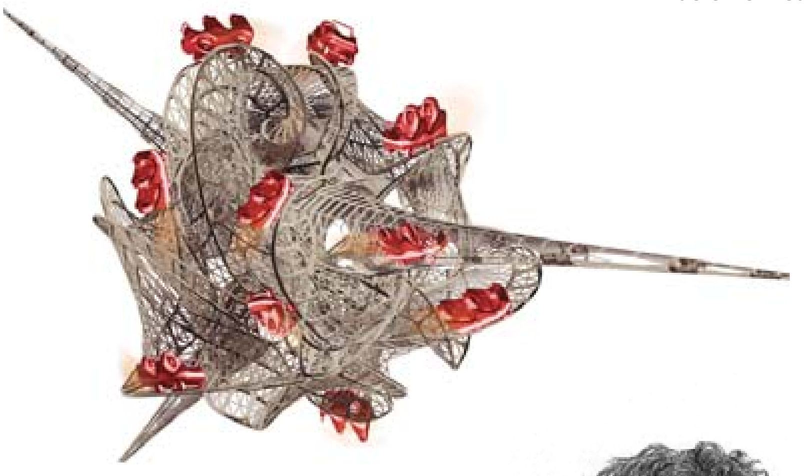
por David Biello

La propuesta del gobierno estadounidense de fabricar la primera ojiva nuclear de nueva generación suscita numerosos interrogantes.

Carrusel cósmico,

por Cliff Burgess y Fernando Quevedo

¿Es la inflación cósmica un signo de que nuestro universo se encuentra inscrito en un territorio más amplio?



La vitamina D y la defensa celular,

por Luz Tavera-Mendoza y John White

La función de la vitamina D va más allá de la osificación. Sin embargo, se la ingiere en cantidad insuficiente. Esa deficiencia vitamínica contribuye quizás a la propagación de enfermedades graves.



Claves de la evolución humana en el Pleistoceno,

por José María Bermúdez de Castro

Hace algo más de dos millones y medio de años se produjo una profunda crisis climática en el planeta, que propició cambios importantes en el curso de la evolución de los homininos. La alteración de la trayectoria ontogénica de nuestros ancestros de finales del Plioceno fue clave en el proceso de hominización.

Combatir la esclerosis lateral amiotrófica,

por Patrick Aebischer y Ann C. Kato

Se han propuesto terapias para una enfermedad paralizante que creíamos incurable.